DEFENCE RESEARCH ESTABLISHMENT
CENTRE DE RECHERHES POUR LA DÉFENSE
VALCARTIER

DREV TN 1999-150

Unlimited distribution/Distribution illimitée

ÉTALONNAGE DES DONNÉES SAISIES PAR UN IMAGEUR HYPERSPECTRAL INTENSIFIÉ

par
David Comeau

Adjoint à la recherche
(étudiant diplômé en génie électrique à l'université de Moncton)

December/décembre 1999

Approved by / approuvé par

Gabriel Ortis

Section Head / Chef de Section

10 décembre 99

Date

AVERTISSEMENT

Les renseignements ci-dessus sont la propriété de Sa Majesté et sont communiqués au destinataire, étant entendu qu'ils seront utilisés uniquement à des fins d'information et d'évaluation. Toute utilisation à des fins commerciales, notamment à des fins de fabrication, est interdite. La diffusion de la présente publication ou de son contenu à des tiers est interdite sans le consentement écrit préalable du MDN du Canada.

© Sa Majesté la reine, représentée par le ministre de la Défense nationale, 1999

TABLE DES MATIÈRES

AVANT-PROPOS V

SOMMAIRE VII

LEXIQUE IX

1.0 INTRODUCTION 2
2.0 IMAGERIE HYPERSPECTRALE PASSIVE ET ACTIVE 3
2.1 Description et Fonctionnement *3*
2.2 Applications possibles *4*
2.3 Ajout d'un intensificateur d'image et association avec un laser *5*
2.4 Avantages et nouvelles applications possibles *6*
2.5 Objectifs principaux *6*
2.6 Problèmes pratiques *7*
3.0 THÉORIE ET CONCEPTS FONDAMENTAUX 8
3.1 Fonctionnement de la CASI intensifiée *8*
3.2 Théorie de l'imagerie linéaire *10*
3.3 Signaux parasitaires *12*
3.4 Signaux parasitaires non dépendant de la radiance (NDR) *13*
3.5 Signaux parasitaires dépendants de la radiance (DR) *14*
4.0 ÉTALONNAGE 17
4.1 Modèle proposé initialement pour l'enlèvement des signaux NDR *17*
4.2 Identification des lacunes du modèle initial *18*
4.3 Modèle utilisé pour l'enlèvement des signaux NDR *18*
4.4 Procédure de détermination des paramètres d'étalonnage des signaux NDR *19*
4.5 Modèle utilisé pour l'enlèvement des signaux DR *21*
5.0 RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX 23
5.1 Variation typique des valeurs obtenues *23*
5.2 Étalonnage des signaux NDR *23*
5.3 Étalonnage des signaux DR *25*
5.4 Étalonnage combiné pour la correction des signaux NDR et DR *26*
5.5 Évaluation du temps de transfert de trame *26*
5.6 Évaluation des effets de diffusion lumineuse *27*
6.0 DISCUSSION ET EXPLICATION DES RÉSULTATS 31
6.1 Discussion *31*
6.2 Explication des résultats obtenus *32*
6.3 Causes possibles de divergences *35*
7.0 CONCLUSION 36
RÉFÉRENCES 37

ANNEXE A: DESCRIPTION DES FONCTIONS ET PROCÉDURES UTILISÉES 38

A.1 FONCTIONS ET PROCÉDURES CRÉÉES 38
A.2 PROCÉDURES DE DÉTERMINATION DES PARAMÈTRES D'ÉTALONNAGE 44
A.3 PROCÉDURES D'ÉTALONNAGE 44
A.4 PROCÉDURES INITIALES MODIFIÉES 46
A.5 PROCÉDURES D'APPELS 47

ANNEXE B: EXEMPLE DE DONNÉES RECUEILLIES 49

B.1 EXEMPLES DE DONNÉES NON-ÉTALONNÉES 49
B.2 EXEMPLES DE DONNÉES ÉTALONNÉES AVEC EO ET DC 50
B.3 EXEMPLES DE DONNÉES ÉTALONNÉES AVEC FSS ET SL 51
B.4 EXEMPLES DE DONNÉES ÉTALONNÉES AVEC EO, DC, FSS ET SL 52

AVANT-PROPOS

Depuis quelques années, l'imagerie hyperspectrale s'est avérée une technologie très utile pour la caractérisation de la végétation et la détection et l'identification de cibles. Un imageur hyperspectral comporte généralement un système optique complexe, un réseau de diffraction qui effectue la séparation de la lumière reçue selon la longueur d'onde et une matrice de détection CCD. Monté sur une plate-forme mobile pour réaliser un balayage horizontal, un imageur hyperspectral CASI (fabriqué par ITRES de Calgary) permet une acquisition numérique en trois dimensions de la radiance de la scène. Dans ce cas, la troisième dimension correspond au profil spectral, c'est-à-dire le contenu en longueur d'onde de chaque pixel spatial représentant la scène.

Avec l'ajout d'un intensificateur et d'un illuminateur laser, l'imageur CASI devient un système actif puisqu'il permet de contrôler l'éclairement de la scène. Ce nouveau système peut être très utile pour l'étude de la réflectance spectrale et de la signature de fluorescence de cibles. L'imagerie hyperspectrale active permet aussi l'étude du degré de polarisation de la lumière réfléchie par les cibles et la détection des objets partiellement obstrués ou encore localisé sous la surface de l'eau. Présentement, il existe des imageurs hyperspectraux possédant une résolution spectrale de quelques nanomètres. Cette résolution spectrale est importante puisqu'elle permet l'identification et la caractérisation d'une scène. Finalement, les nombreuses applications possibles d'un tel système font en sorte que l'avenir de l'imagerie hyperspectrale active semble prometteur.

Le présent travail de recherche a été effectué au CRDV entre le 1 mai 1999 et le 31 août 1999 dans le cadre de l'unité de travail 3da29: "Use of Laser Induced Fluorescence with Hyperspectral Imaging Techniques for Surveillance, Detection, and Identification". Le présent document fait état d'un travail effectué lors d'un stage de quatre mois sous la supervision de J.-R. Simard.

SOMMAIRE

Après l'acquisition numérique de données provenant d'un imageur spectrographique, il importe que les données obtenues soient représentatives de la scène. En fait, tout bon système d'imagerie doit offrir une bonne linéarité entre l'image de la scène et l'image obtenue de cette scène. À cet effet, le spectromètre-imageur compact CASI (Compact Airborne Spectrographic Imager) avec intensificateur, doit être étalonné selon une procédure bien précise. Le but premier de cet étalonnage est l'obtention d'une mesure en tout point de la scène de la radiance absolue en terme d'unité standard de radiance spectrale (μW cm-2 sr^{-1} nm^{-1}).

L'étalonnage de la caméra CASI intensifiée, c'est-à-dire comprenant un intensificateur d'image, nécessite la mesure de plusieurs paramètres d'étalonnage qui n'interviennent pas dans la CASI normale. Parmi les paramètres d'étalonnage à caractériser dans la CASI standard, il y a respectivement, le décalage électronique, le courant d'obscurité, les effets de diffusion lumineuse, les effets de brouillage dû au transfert de trame et de l'ouverture numérique. De plus, dans le cas de la CASI intensifiée, l'effet du gain de l'intensificateur d'image doit aussi être caractérisé pour en permettre un étalonnage absolu.

Le recours à une sphère d'intégration permet l'obtention d'une partie des paramètres d'étalonnage nécessaires. Ce type de sphère est une source lumineuse de radiance uniforme avec un contenue spectral étalonné de manière absolue. En plus de permettre la caractérisation de la sensibilité radiante de chaque pixel du CCD, la sphère d'intégration permet aussi l'étude des effets du brouillage dû au transfert de trame, de diffusion lumineuse, du gain de l'intensificateur et de l'ouverture numérique.

LEXIQUE

ACR: Ratio de Correction Absolue (Absolute Correction Ratio)
A/D: Analogue à Digital (Analog to Digital)
AHSI: Imageur Hyperspectral Actif (Active Hyperspectral Spectral Imaging)
CASI: Imageur Spectrographique Compact Aéroporté (Compact Airborne Spectrographic Imager)
CCD: Détecteur à Transfert de Charge (Charge Couple Device)
COR: Corrigé (Corrected)
CRDV : Centre de Recherche pour la Défense de Valcartier (Defence Research Establisement Valcartier)
DC: Courant d'Obscurité (Dark Current)
DN: Valeur Numérique (Data Number)
DR: Dépendant de la Radiance (Radiant Dependant)
ERR: Erreur (Error)
ENVI: ENvironnement pour la Visualisation d'Image (ENvironement for Visualization Imagery)
EO: Décalage Électronique (Electronic Offset)
FOV: Champ de Vision (Field Of View)
FSS: Traînage ou Brouillage dû au Transfert de Trame (Frame Shift Smear)
FTT: Temps de Transfert de Trame (Frame Transfer Time)
HIS: Imagerie Hyperspectrale (Hyperspectral Imaging)
IDL: Langage de Données Interactifs (Interactive Data Language)
IT: Temps d'intégration (Integration Time)
ITRES: Technologie Innovatrice de la Détection à Distance (Innovative Technology in REmote Sensing)
L/H: Octet Moins Significatif/Octet Plus Significatif (Low/High byte)
NA: Ouverture Numérique (Numerical Aperture)
NCOR: Non Corrigé (Not Corrected)
NDR: Non Dépendant de la Radiance (Not Radiant Dependant)
NIR: Infrarouge Proche (Near Infra-red)
RSC: Coefficient de Sensitivité Radiométrique (Radiometric Sensitivity Coefficient)
SAM: Cartographe d'Angle Spectral (Spectral Angle Mapper)
SL: Diffusion lumineuse ou Lumière Dispersée (Scattered Light)
SRC: Canal de Recouvrement de Scène (Scene Recovery Channel)
SRU: Valeur de Radiance Spectrale (Spectral Radiance Value)

1.0 INTRODUCTION

Le présent travail consiste à expliquer les démarches nécessaires à l'étalonnage radiométrique des données recueillies par une caméra hyperspectrale intensifiée. La caméra hyperspectrale intensifiée en question est la CASI de la compagnie ITRES Instrument Inc. Du fait que cette caméra a été modifiée par l'ajout d'un intensificateur d'image, une nouvelle procédure d'étalonnage radiométrique s'est avérée nécessaire. L'objectif premier de cet étalonnage est l'obtention de mesures de radiance spectrale en unité standard. Les unités standards de radiance spectrale sont en $\mu W\ cm^{-2}\ sr^{-1}\ nm^{-1}$. Dans le but de réaliser cet objectif, plusieurs signaux parasitaires devront être enlevés des données recueillies. Par la suite, les données étalonnées seront converties en unité standard de radiance spectrale par l'utilisation de coefficients de sensibilité radiométrique.

Le présent document sera divisé en plusieurs chapitres. Le chapitre 2 fera une description globale des aspects associés à l'imagerie hyperspectrale passive et active. Pour ce faire, la présentation et la description d'un schéma de fonctionnement d'un imageur hyperspectral seront effectuées. De plus, quelques exemples typiques d'applications d'un imageur hyperspectral seront présentés. Ce chapitre se terminera en abordant les objectifs principaux du présent travail ainsi que les problèmes pratiques que ceux-ci représentent.

Le chapitre 3 fera la présentation des concepts fondamentaux de fonctionnement d'un imageur hyperspectral intensifié ainsi que la théorie associée à ces concepts. À cet effet, le fonctionnement de la CASI intensifiée sera expliqué. Par la suite, la théorie de l'imagerie linéaire ainsi que les différents signaux parasitaires applicables seront présentés.

Le chapitre 4 consistera à expliquer les démarches ainsi que les différents problèmes rencontrés pendant l'étalonnage de la caméra. Les modèles d'étalonnage initialement proposés et utilisés seront ainsi présentés pour chaque type de signaux parasitaires.

La présentation des résultats expérimentaux obtenus à la suite de l'enlèvement des différents signaux parasitaires sera effectué dans le chapitre 5. Une section sera aussi réservée à l'évaluation du temps de transfert de trame et à celui des effets de diffusion lumineuse interne.

Enfin, le dernier chapitre fera l'analyse des résultats présentés au chapitre précédent. Pour ce faire, des explications seront présentées dans le but de rendre compte des résultats obtenus. Par la suite, les causes possibles d'erreurs ainsi que la précision des mesures obtenues seront discutées.

Finalement, ce rapport comporte une brève conclusion qui résume le travail accompli ainsi que les principaux problèmes encourus. Enfin, ce document se terminera par l'énumération des travaux futurs à effectuer dans le but d'obtenir un étalonnage radiométrique complète de la caméra selon toutes les configurations possibles.

2.0 IMAGERIE HYPERSPECTRALE PASSIVE ET ACTIVE

Le présent chapitre couvre les principaux aspects concernant l'imagerie hyperspectrale passive et active. Pour ce faire, la description d'une caméra hyperspectrale normale comme la CASI sera présentée. Après l'énumération des principes généraux de fonctionnement, une liste des applications possibles sera énoncée. Par la suite, l'ajout d'un l'intensificateur et d'un laser sera discuté, et la caméra CASI intensifiée sera introduite et décrite brièvement. Finalement, ce chapitre se terminera par la présentation des problèmes pratiques que la CASI intensifiée engendre ainsi que des objectifs principaux visés par le présent document.

2.1 Description et Fonctionnement

Le fonctionnement d'un imageur hyperspectral passif (HIS) est, de façon générale, assez simple. Tout comme pour une caméra standard, l'image est focalisée par l'objectif. Pour mieux comprendre les différents éléments optiques qui seront décrits, il est recommandé de consulter la figure 1.

Au point focal de l'objectif, une fente verticale est insérée afin de conserver seulement la distribution radiative de la scène correspondant à cette ouverture (tranche). Parfois, la lentille de l'objectif est remplacée par un système optique permettant d'asservir l'ouverture numérique selon les besoins requis. En plaçant cette fente au plan focal d'une seconde lentille, la radiance émanant de cette fente est alors rendue parallèle et dirigée vers un réseau de diffraction, qui a pour fonction d'effectuer la dispersion chromatique de cette radiance. Finalement, le faisceau diffracté est focalisé pour former l'image de la fente le long des rangées d'un détecteur CCD, chaque rangée correspondant à l'image de la fente faite à différentes longueurs d'onde. Ce système optique fait en sorte que les rangées du CCD sont alors représentatives de la longueur d'onde et que les colonnes sont représentatives de l'image projetée par la fente. L'image de la fente est à son tour représentative d'une section verticale du champ de vision. L'obtention d'une image en deux dimensions consiste alors à effectuer un balayage dans une direction spécifique. L'acquisition successive des différentes trames permet l'obtention de la deuxième dimension spatiale. Bien entendu, afin que l'image conserve son rapport dimensionnel selon x et y (Aspect Ratio), il faut ajuster la durée des prises de chaque trame en fonction de la vitesse de balayage.

Le CCD utilisé pour l'imageur hyperspectral CASI comprend 612 pixels spatiaux et 288 pixels spectraux. Par contre, seulement 512 des 612 pixels spatiaux sont utilisés pour représenter la scène. L'éventail des longueurs d'onde dispersées sur les 288 pixels couvrent un intervalle spectral allant de 359nm à 918nm (selon les coefficients calculés au CRDV). Par conséquent, chaque échantillon spectral (une rangée de pixel) est associé à une bande d'environ 1.9 nm.

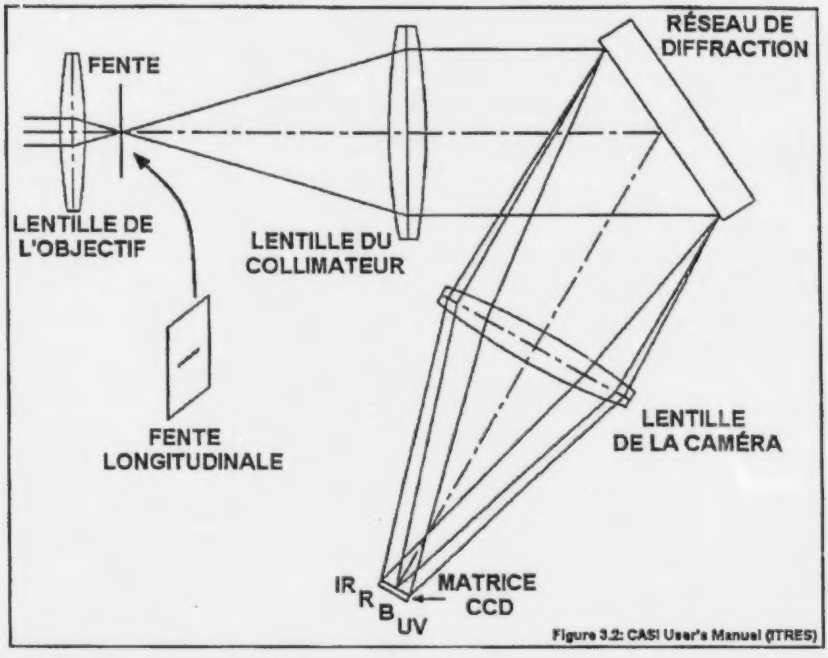


FIGURE 1 - Schéma interne de la CASI

2.2 Applications possibles

Les applications d'un système d'imagerie hyperspectrale sont nombreuses. Comparativement à un système d'imagerie standard à trois couleurs, la résolution spectrale d'un imageur hyperspectral est beaucoup plus élevée. Cette démarcation fait en sorte que celle-ci peut différencier chaque longueur d'onde avec une grande précision.

Comme il a été fait mention auparavant, la résolution spectrale typique de ce genre de système CASI est de l'ordre de 1.9nm. Cette caractéristique permet par exemple de différencier un champ de conifère d'un champ de feuillus selon le profil spectral associé à chacune de ces essences. C'est ainsi qu'il est fréquent d'utiliser ce genre d'imageur pour l'étude du développement des forêts et des récoltes: on installe alors la caméra sur un avion (voir la figure 2).

Dans certain cas, la caméra peut être utilisée à des fins de prévention. En effet, deux autres applications possibles sont l'étude des infestations d'insectes nuisibles et l'étude du développement des déserts. Dans ces deux cas respectifs, des mesures préventives telles que les épandages de pesticides ou la création de programmes afin de combattre la désertification peuvent être déployées.

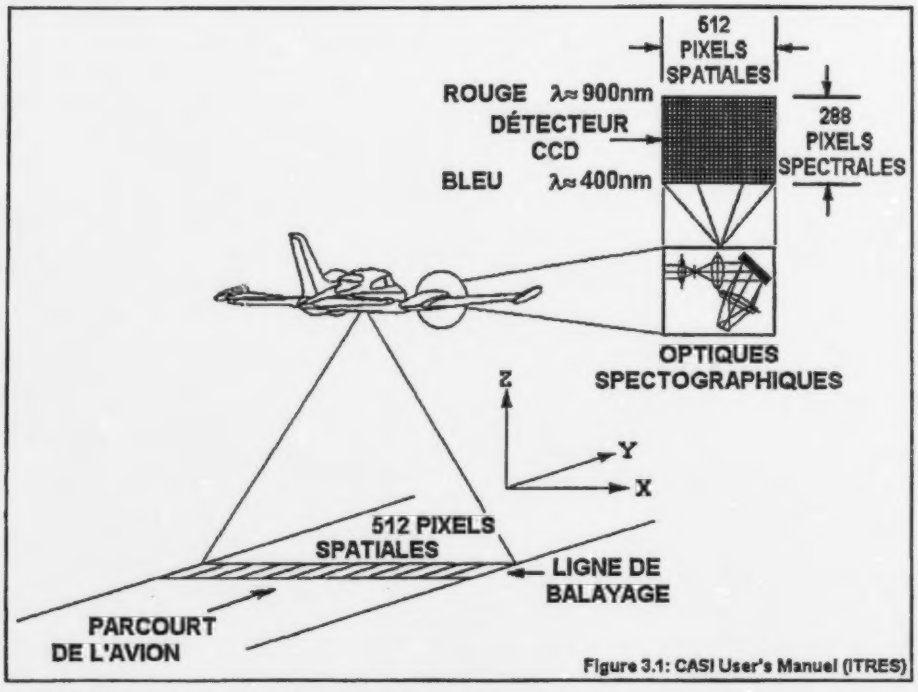


FIGURE 2 - Application de la CASI sur un avion

Finalement, une dernière application possible qui peut s'avérer très importante en termes de sécurité publique est la détection des cultures illicites, telles que les champs de marijuana. En effet, la sensibilité spectrale d'une caméra hyperspectrale étant très grande, celle-ci peut être mise à profit pour détecter différentes plantations illégales. Les feuilles de marijuana ayant un profil spectral de radiance bien spécifique, la détection de la présence de ces champs illicites peut être faite à partir d'une plate-forme aéroportée.

2.3 Ajout d'un intensificateur d'image et association avec un laser

Afin d'adapter la CASI standard à des besoins militaires spécifiques, le CRDV a demandé au manufacturier (ITRES) d'insérer, à même l'optique originale, un intensificateur d'image contrôlable, communément appelé en anglais "gateable intensifier". En fait, il s'agit d'une matrice à micro-canaux qui a été rajoutée immédiatement en avant du CCD. Cette matrice a pour fonction d'amplifier électriquement chaque photon incident. Ces micro-canaux sont contrôlables en tension (>1000V), ce qui permet de les utiliser comme interrupteur rapide. De plus, ces micro-canaux permettent le contrôle du gain optique par le biais de la tension appliquée. Cette particularité permet un visionnement de nuit comme de jour par l'ajustement de ce gain.

L'association d'un imageur hyperspectral avec un laser pulsé augmente aussi de façon considérable les applications militaires potentielles. En plus de servir d'illuminateur, le laser permet l'observation de tranche spatiale en synchronisant les pulses lumineux avec la CASI intensifiée. Avec une synchronisation adéquate, il est par exemple possible de visualiser un objet sous la surface de l'eau sans avoir l'effet de la réflexion à l'interface air/eau. Un imageur hyperspectral actif peut être aussi indépendant de l'illumination extérieure si la lumière ambiante collectée durant l'ouverture de l'intensificateur est négligeable en comparaison avec celle provenant du pulse laser. La combinaison d'un imageur hyperspectral intensifié avec le laser conduit au concept d'imagerie hyperspectral active (AHSI).

2.4 Avantages et nouvelles applications possibles

Les avantages militaires qui découlent de l'ajout de l'intensificateur et du couplage avec un laser sont nombreux. L'intensificateur pouvant être contrôlé avec précision, il est possible d'obtenir une image représentant une tranche de quelques mètres en profondeur. Comme il a été mentionné, ces ajouts font en sorte que la caméra n'est plus passive, mais plutôt active.

Une de ces applications est la détection des objets partiellement obstrués. En effet, les réflexions non désirables peuvent être éliminées par sélection en distance. Par conséquent, l'image formée est alors plus représentative de ce que l'on recherche. En utilisant ce principe, il est possible de visualiser les objets localisés sous la surface de l'eau, la réflexion de la lumière à l'interface air/eau étant rejetée par la caméra.

Une application typiquement militaire est celle de la détection/identification de cibles. Par exemple, en caractérisant au préalable le profil de fluorescence des véhicules alliés, il serait alors possible de différencier les véhicules amis des autres véhicules sur le champ de bataille. Éventuellement, il serait même possible d'ajouter divers éléments fluorescents dans la peinture utilisée pour chaque véhicule militaire, ce qui permettrait d'identifier individuellement ceux-ci selon leurs signatures de fluorescence respectives.

Finalement, une autre façon de détecter une cible est par l'étude du degré de polarisation de la lumière réfléchie. En effet, tout comme la signature de fluorescence de la peinture, l'identification des cibles peut s'effectuer par l'étude du degré de polarisation de la réflexion. De façon générale, une lumière polarisée réfléchie sur un objet créé par l'homme possédera un degré de polarisation plus élevé que pour un objet naturel. Par conséquent, les objets fabriqués par l'homme pourraient être détectés en faisant l'étude de la polarisation de la lumière qu'ils réfléchissent.

2.5 Objectifs principaux

Les objectifs principaux du présent travail sont d'effectuer toutes les démarches nécessaires afin de rendre les données recueillies par la caméra les plus représentatives possibles

de la radiance spectrale réelle de la scène observée. Pour ce faire, un modèle du fonctionnement interne de la caméra sera présenté afin d'en effectuer l'étalonnage radiométrique.

Suite à la validation du modèle choisi, une procédure de détermination des paramètres sera programmée grâce au langage de programmation IDL. Après avoir fait la détermination de ces paramètres, la programmation des procédures faisant l'étalonnage proprement dit sera réalisée. Cette procédure devrait tenir compte de tous les paramètres d'étalonnage obtenus. Afin de faciliter la compréhension, il importe que les procédures soient bien identifiées et qu'elles soient de préférence divisées en bloc ayant des fonctions bien spécifiques.

À la suite de l'étalonnage des données recueillies par la caméra, il faut ensuite évaluer les effets des différents paramètres externes tels que le gain de l'intensificateur et l'ouverture numérique de l'optique. Tout comme les autres paramètres, ceux-ci devront être analysés et étalonnés.

Finalement, une matrice de conversion devra être construite afin de représenter chaque pixel selon sa radiance spectrale absolue, c'est-à-dire en ($\mu W\ cm^{-2}\ sr^{-1}\ nm^{-1}$). Ce sont ces unités standards de radiance qui permettront d'universaliser les résultats obtenus avec cette caméra.

2.6 Problèmes pratiques

Les problèmes liés à l'étalonnage de la caméra CASI intensifiée sont principalement dus au fait que la caméra possède un intensificateur d'image. En effet, cet ajout nécessite l'introduction de nouveaux paramètres dans le calcul des coefficients d'étalonnage. Les coefficients de sensibilité radiante permettent de représenter les données étalonnées recueillies en terme de radiance spectrale. Bien que la génération de ces paramètres soit très peu discutée dans le présent travail de recherche, celle-ci sera très importante dans tous travaux futurs afin d'étalonner radiométriquement les données obtenues par cette caméra.

3.0 THÉORIE ET CONCEPTS FONDAMENTAUX

Le présent chapitre a pour but de présenter les concepts fondamentaux associés à un imageur hyperspectral intensifié ainsi que la théorie associée à ces concepts. Ainsi, le fonctionnement de la CASI intensifiée sera expliqué de façon textuelle et graphique. Ensuite, les liens que comporte la théorie de l'imagerie linéaire avec les signaux parasitaires introduits seront présentés. Finalement, les différents signaux parasitaires seront classés en deux catégories différentes: ceux qui ne dépendent pas de la radiance et ceux qui en dépendent.

3.1 Fonctionnement de la CASI intensifiée

La différence fondamentale entre la CASI standard et la CASI intensifiée est essentiellement l'ajout d'un intensificateur d'image. Cet intensificateur d'image, communément appelé en anglais "microchannel plate", a pour fonction d'amplifier le signal associé à chaque photon incident par un facteur dicté par la différence de potentiel qui lui est appliquée. Un intensificateur d'image est en réalité une multitude de micro-canaux d'amplification électronique disposés en matrice afin de former une plaque d'amplification (Figure 3).

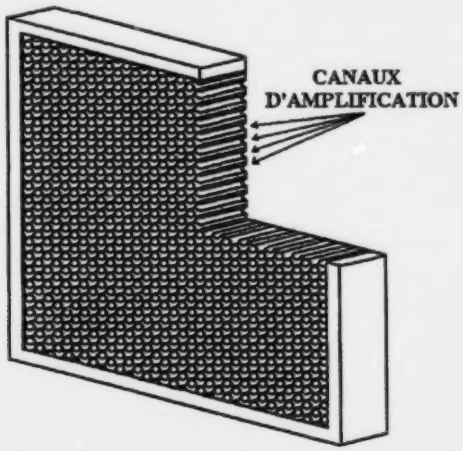


FIGURE 3 - Plaque d'amplification à micro-canaux

Pour mieux comprendre le fonctionnement d'un micro-canal d'amplification, il importe de bien comprendre la figure 4. On peut y constater que les photons incidents frappant la photocathode provoquent la création d'un nombre équivalent d'électrons. Les électrons produits sont par la suite accélérés par le champ électrique intense et multipliés plusieurs fois lors de leurs collisions avec la paroi du micro-canal. Les électrons sont ensuite projetés sur un écran phosphorescent faisant ainsi la reconversion des électrons en photons. Bien que ce système soit bel et bien un amplificateur d'image, il ne peut en aucun cas émettre des photons ayant la même longueur d'onde que les photons incidents. Les photons émis par l'anode suivent un profil spectral spécifique (mais unique) dicté par le matériel composant l'écran phosphorescent.

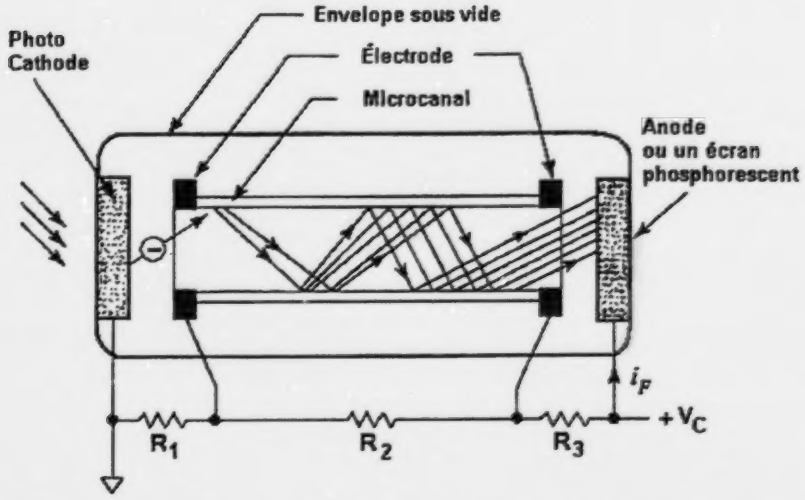


FIGURE 4 - Amplification des électrons dans un micro-canal

Une plaque d'intensification ou encore intensificateur d'image a été insérée dans la CASI, tout juste en avant de la matrice de détection CCD. Il en résulte que la sensibilité de la caméra est accrue de telle sorte que la formation d'une image d'une scène présentant une très faible radiance est dorénavant possible. De plus, étant donné que le gain de l'intensificateur peut être contrôlé en fonction du temps, il est maintenant possible d'utiliser la caméra CASI intensifiée de façon active, c'est-à-dire en utilisant celle-ci avec un laser pulsé comme source d'illumination.

Le schéma interne de la CASI, suite à l'ajout de l'intensificateur, est présenté de façon générale à la figure 5.

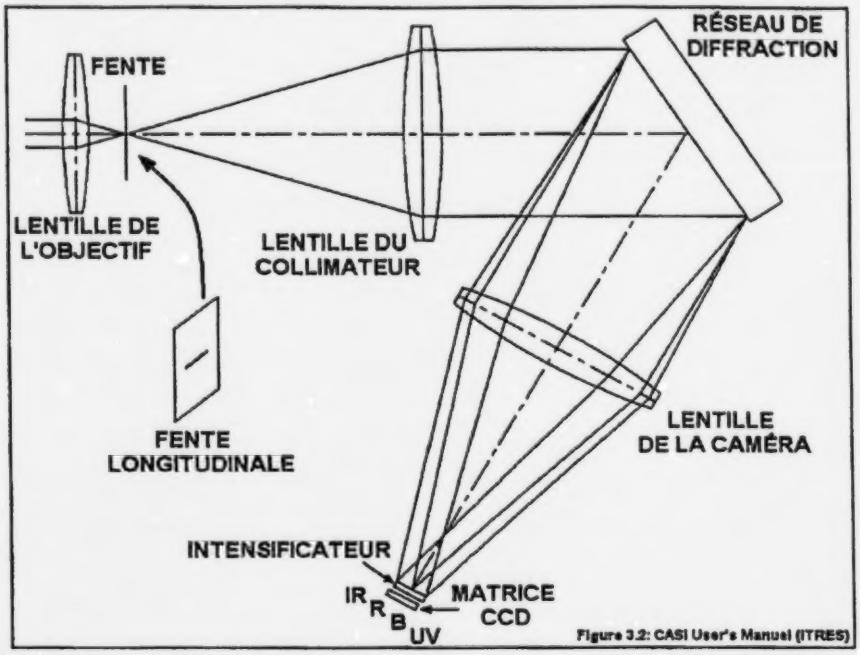


FIGURE 5 - Schéma interne de la CASI suite à l'ajout de l'intensificateur

3.2 Théorie de l'imagerie linéaire

Tout bon système d'imagerie doit offrir une bonne linéarité entre la radiance de la scène et le flux radiatif de l'image formée correspondante. De façon générale, plus cette linéarité est précise, plus le système d'imagerie est de haute qualité. Un système d'imagerie idéal est représenté par le modèle suivant:

$$\phi^I_{i,j} = k\, L^O_{i,j}, \tag{1}$$

Où: $\phi^I_{i,j}$: distribution du flux radiatif dans le plan image (W)
k : constante
$L^O_{i,j}$: distribution correspondante de la radiance dans le plan objet (W st^{-1} m^{-2})
i, j : (i: colonne, j: rangée)

Pour un CCD, la constante k est fréquemment représentée selon sa position respective en i et j. Par conséquent, celle-ci peut aussi s'exprimer comme étant $k_{i,j}$. La même équation du système d'imagerie linéaire est alors représentée de la façon suivante:

$$\phi^I_{i,j} = k_{i,j}\, L^O_{i,j}, \tag{2}$$

Où: $k_{i,j}$: constante distribuée selon i,j
i, j : (i: colonne, j: rangée)

La plupart des systèmes d'imagerie intègre le flux radiatif pendant une période de temps déterminée. Les charges $Q_{i,j}^{R}$ ainsi accumulées pendant cette période sont alors représentatives de la radiance en position i et j de la scène. Le tout peut ainsi être représenté par cette formule:

$$Q_{i,j}^{R} = k_{i,j} L_{i,j}^{O} \Delta t , \tag{3}$$

Où: $Q_{i,j}^{R}$: charges accumulées à la position i,j pendant une période Δt (J)
Δt: temps d'intégration
i, j : (i: colonne, j: rangée)

Dans le but d'appliquer la théorie de l'imagerie linéaire au fonctionnement de la CASI intensifiée, il importe d'introduire plusieurs autres paramètres. Tout d'abord, on définit l'angle solide de collection de la caméra comme étant le rapport entre la section de la pupille d'entrée de la caméra divisée par le carré de la distance séparant la caméra du plan objet. Celui-ci s'exprime alors de la façon suivante:

$$\Omega_c = \frac{A_c}{r^2}, \tag{4}$$

Où: Ω_c: angle solide en stéradian (st)
A_c: section de la pupille d'entrée de la caméra (m^2)
r: distance entre le plan objet et la caméra (m)

Enfin, en considérant tous les paramètres importants dans le système d'imagerie de la CASI intensifiée, l'équation suivante peut être obtenue:

$$Q_{i,j}^{R} = L_{i,j}^{O} \frac{A_c}{r_{i,j}^2} r_{i,j}^2 \Omega_{i,j}^{FOV} t_{i,j}^{A} t_{i,j}^{O} g_{i,j} \eta_{i,j} \Delta t , \tag{5}$$

Où: $Q_{i,j}^{R}$: charges accumulées selon i,j pendant Δt dues à la radiance (J)

$\frac{A_c}{r_{i,j}^2}$: cône de collection de la caméra selon i, j (st)

$r_{i,j}^2 \Omega_{i,j}^{FOV}$: superficie de la région de la scène regardée à la position i,j (m^2)

$t_{i,j}^{A}$: coefficient de transmission de l'atmosphère pour i,j

$t_{i,j}^{O}$: coefficient de transmission de l'optique pour i,j

$g_{i,j}$: gain de l'intensificateur du pixel i,j

$\eta_{i,j}$: efficacité quantique de conversion énergétique pour chaque pixel i,j

i, j : (i: colonne, j: rangée)

Dans le but de simplifier l'équation 5, il est avantageux de combiner plusieurs paramètres en un seul, $C_{i,j}$, dans lequel on introduit la longueur focale (f) afin de redéfinir la section de la lentille de collection en fonction de l'ouverture numérique ($A_c=\pi*f^2/4*F\#^2$). Ce paramètre $C_{i,j}$ se définit alors comme:

$$C_{i,j} = \frac{\pi}{4} f^2 \Omega_{i,j}^{FOV} \, t_{i,j}^{O} \, \eta_{i,j}, \tag{6}$$

Où: $C_{i,j}$: paramètre commun selon i,j
$\Omega_{i,j}^{FOV}$: angle solide vu par le pixel ij
f: longueur focale de l'objectif de la caméra
i, j : (i: colonne, j: rangée)

L'ouverture numérique (F#) est un paramètre fréquemment utilisé dans la plupart des systèmes d'imagerie. De façon générale, ce paramètre est une indication sur la quantité de flux que la lentille du système d'imagerie laisse passer. Plus le F# augmente, moins la lentille laisse passer de flux. En fait, le F# est inversement proportionnel à la section de collection de la lentille.

Enfin, la radiance absolue en tout point i,j peut être retrouvée en fonction des paramètres initiaux. L'équation suivante représente alors la relation linéaire existant entre la radiance de la scène en un point quelconque et la charge créée par cette radiance dans le plan image:

$$L_{i,j}^{O} = \frac{Q_{i,j}^{R} \, F\#_{i,j}^{2}}{C_{i,j} \, g_{i,j} \, t_{i,j}^{A} \, \Delta t}, \tag{7}$$

Sachant que la variable $t_{i,j}^{A}$ est directement reliée à la scène à imager et que Δt est un facteur externe invariable selon i et j, il est possible de déduire que les seuls paramètres qu'il faut caractériser pour faire l'étalonnage sont $F\#_{i,j}^{2}$, $g_{i,j}$ et $C_{i,j}$.

3.3 Signaux parasitaires

Les signaux obtenus avec une caméra CCD comme la CASI possèdent plusieurs signaux parasitaires non identifiés dans le modèle linéaire présenté à l'équation 7. De façon générale, l'étalonnage d'une caméra CCD consiste à enlever un terme d'erreur sur une mesure brute non-corrigée. Cette correction d'erreur, a pour but de rendre linéaire la relation entre l'objet à représenter et l'image formée par cet objet.

$$Q_{i,j}^{COR} = Q_{i,j}^{NCOR} - Q_{i,j}^{ERR}, \tag{8}$$

Où: $Q_{i,j}^{COR}$: signal corrigé selon i,j
$Q_{i,j}^{NCOR}$: signal non-corrigé selon i,j

$Q_{i,j}^{ERR}$: terme d'erreur sur le signal selon i,j

i, j : (i: colonne, j: rangée)

Les principaux paramètres dont il faut tenir compte pendant l'étalonnage de la CASI intensifiée sont respectivement, le décalage électronique, le courant d'obscurité, le brouillage dû au transfert de trame et les effets de diffusion lumineuse. La notation anglaise de ceux-ci sont respectivement, "Electronic Offset (EO)", "Dark Curent (DC)", "Frame Shift Smear (FSS)" et "Scattered Light (SL)".

Ces quatre signaux parasitaires peuvent être divisés en deux classes distinctes. Le EO et le DC sont tous deux des signaux parasitaires qui ne dépendent pas de la radiance de la scène. À l'opposé, le FSS et le SL sont des signaux qui dépendent de cette radiance. Il est par conséquent possible de représenter le terme d'erreur mentionné précédemment de la façon suivante:

$$Q_{i,j}^{ERR} = Q_{i,j}^{NDR} + Q_{i,j}^{DR}, \tag{10}$$

Où: $Q_{i,j}^{ERR}$: terme d'erreur sur le signal selon i,j

$Q_{i,j}^{NDR}$: terme d'erreur indépendant de la radiance selon i,j

$Q_{i,j}^{DR}$: terme d'erreur dépendant de la radiance selon i,j

i, j : (i: colonne, j: rangée)

3.4 Signaux parasitaires non dépendant de la radiance (NDR)

Les signaux d'erreurs indépendants de la radiance $Q_{i,j}^{NDR}$ peuvent être séparés en deux composantes distinctes. Ces deux composantes sont respectivement le $Q_{i,j}^{EO}$ et le $Q_{i,j}^{DC}$ et sont reliées de la façon suivante:

$$Q_{i,j}^{NDR} = Q_{i,j}^{EO} + Q_{i,j}^{DC}, \tag{10}$$

Où: $Q_{i,j}^{NDR}$: terme d'erreur indépendant de la radiance selon i,j

$Q_{i,j}^{EO}$: terme d'erreur dû au décalage électronique (EO) selon i,j

$Q_{i,j}^{DC}$: terme d'erreur dû au courant d'obscurité (DC) selon i,j

i, j : (i: colonne, j: rangée)

En premier lieu, le signal $Q_{i,j}^{EO}$ est le signal qui est ajouté au signal brut dans le but d'éviter d'avoir des valeurs négatives lorsque le bruit est présent. L'ajout de celui-ci est effectué de façon analogique et ce, avec un niveau suffisamment élevé pour éviter l'insertion de toutes valeurs négatives lors de la conversion analogique à numérique (A/D).

En deuxième lieu, le signal $Q_{i,j}^{DC}$ est généré par l'agitation thermique interne de chaque élément photo-détecteur du CCD. De façon générale, le signal d'erreur varie exponentiellement avec la température du CCD. Heureusement, le CCD utilisé pour la CASI possède un système de refroidissement qui permet de garder la température relativement stable (fixée à 278°K). L'effet de la variation de la température peut alors être considéré comme faible. Sachant que la saisie de chaque trame est effectuée pendant un temps d'intégration spécifique, la valeur DC mesurée est directement proportionnelle au temps d'intégration. Ainsi, on exprime souvent $Q_{i,j}^{DC}$ selon son taux de génération $q_{i,j}^{DC}$ et Δt de la façon suivante:

$$Q_{i,j}^{DC} = q_{i,j}^{DC}\ \Delta t\,, \tag{11}$$

$Q_{i,j}^{DC}$: terme d'erreur due au DC selon i,j
$q_{i,j}^{DC}$: taux de génération du DC selon i,j
Δt: temps d'intégration
i, j : (i: colonne, j: rangée)

3.5 Signaux parasitaires dépendants de la radiance (DR)

Les signaux d'erreurs dépendants de la radiance $Q_{i,j}^{DR}$ peuvent être séparés en deux composantes distinctes qui sont respectivement le FSS et le SL. Ces signaux d'erreur dépendants de la radiance peuvent être représentés de la façon suivante:

$$Q_{i,j}^{DR} = Q_{i,j}^{FSS} + Q_{i,j}^{SL}\,, \tag{12}$$

Où: $Q_{i,j}^{DR}$: terme d'erreur dépendant de la radiance
$Q_{i,j}^{FSS}$: terme d'erreur dû au FSS
$Q_{i,j}^{SL}$: terme d'erreur due au SL
i, j : (i: colonne, j: rangée)

On définit la composante FSS comme étant la quantité de signal reçue pendant le temps de transfert de trame qui ne correspond pas directement à la distribution de la radiance de la scène. Ce phénomène est dû typiquement à la façon dont le CCD est lu. Pendant la lecture, c'est-à-dire pendant le temps de transfert de charge, chaque groupe de charges correspondant à l'intégration de la radiance de la scène pour une position i,j reçoit des charges additionnelles en raison de leur court temps d'exposition successif (dT) à la radiance de la scène correspondant aux positions des autres pixels de la colonne (direction de transfert de la trame) et du DC. Ce temps d'exposition est identique pour chaque cellule et peut se représenté par formule suivante:

$$dT = \frac{FTT}{288}\,, \tag{13}$$

Où: dT: temps d'exposition à chaque portion du spectre (pour une rangée)
FTT: temps de transfert de trame

Pendant le temps de transfert de trame, chaque pixel emmagasine respectivement des charges photo-induites dues à la distribution de la radiance le long des colonnes du CCD ainsi que des charges thermiquement induites (DC). Cette accumulation de charges se fait à la fois avant et après l'exposition. L'amplitude du signal FSS est proportionnelle au rapport entre le temps de transfert et le temps de transfert additionner avec le temps d'intégration (environ 3% pour Δt=50ms). En faisant la supposition que le temps de transfert est uniforme sur toutes les rangées, Q_i^{FSS} s'exprime de la façon suivante:

$$Q_i^{FSS} = \left(\frac{FTT}{\Delta t + FTT}\right)\frac{1}{288}\sum_{J=0}^{287}\left(Q_{I,J}^{NCOR} - Q_{i,j}^{EO}\right), \tag{15}$$

Δt: temps d'intégration
FTT: temps de transfert de l'image
i, j : (i: colonne, j: rangée)

Pour mieux comprendre la provenance de cette équation, il importe de bien comprendre la démonstration suivante, qui est basée sur le modèle de base appliqué au CCD.

Soit: $$Q_{I,J}^{NCOR} = Q_{I,J}^{COR} + Q_{i,j}^{EO} + Q_{I,J}^{DC} + Q_{I,J}^{FSS} + Q_{I,J}^{SL}\ , \tag{16}$$

Où: $$Q_{I,J}^{COR} = Q_{I,J}^{R} = q_{I,J}^{R}\ \Delta t\ , \tag{17}$$

$$Q_{I,J}^{EO} = \text{constante}_{i,j}, \tag{18}$$

$$Q_{I,J}^{DC} = q_{I,J}^{DC}\ \Delta t\ , \tag{19}$$

$$Q_{I,J}^{SL} = q_{I,J}^{SL}\ \Delta t\ , \tag{20}$$

$$Q_{I,J}^{FSS} = Q_{I}^{FSS}\ . \tag{21}$$

Pendant le temps de transfert de trame (FTT), le signal FSS selon une colonne est la partie du signal qui est intégrée sur toute cette colonne. Le signal intègre alors la somme des composantes $q_{I,J}^{R}$, $q_{I,J}^{DC}$ et $q_{I,J}^{SL}$ produites. Ces trois signaux sont tous intégrés pendant la courte période de temps que représente la descente du paquet de charge le long de la colonne du CCD lors de la lecture. Par conséquent, le Q_i^{FSS} peut être représenté par la sommation suivante:

$$Q_{I,J}^{FSS} = Q_{I}^{FSS} = \sum_{J=0}^{287}\left(q_{I,J}^{R} + q_{I,J}^{DC} + q_{I,J}^{SL}\right)dT\ , \tag{22}$$

En utilisant les relations représentées aux équations 13 et 16 à 21, il est possible de développer l'équation précédente et de retrouver l'équation 15 que le manufacturier suggère pour l'enlèvement du Q_i^{FSS} :

$$Q_{i,j}^{FSS} = Q_i^{FSS} = \sum_{j=0}^{287}\left(q_{i,j}^{R} + q_{i,j}^{DC} + q_{i,j}^{SL}\right)dT$$

$$= \frac{FTT}{288}\left(\frac{1}{\Delta t}\right)\sum_{j=0}^{287}\left(Q_{i,j}^{R} + Q_{i,j}^{DC} + Q_{i,j}^{SL}\right)$$

$$= \frac{FTT}{288}\left(\frac{1}{\Delta t}\right)\sum_{j=0}^{287}\left(Q_{i,j}^{NCOR} - Q_{i,j}^{EO} - Q_{i,j}^{FSS}\right)$$

$$= \left(\frac{FTT}{\Delta t}\right)\left(\overline{Q_{i,j}^{NCOR}} - \overline{Q_{i,j}^{EO}} - Q_i^{FSS}\right)$$

$$Q_i^{FSS}\left(1 + \frac{FTT}{\Delta t}\right) = \left(\frac{FTT}{\Delta t}\right)\left(\overline{Q_{i,j}^{NCOR}} - \overline{Q_{i,j}^{EO}}\right)$$

$$Q_i^{FSS}\left(\frac{\Delta t + FTT}{\Delta t}\right) = \left(\frac{FTT}{\Delta t}\right)\left(\overline{Q_{i,j}^{NCOR}} - \overline{Q_{i,j}^{EO}}\right)$$

$$Q_i^{FSS} = \left(\frac{FTT}{\Delta t + FTT}\right)\left(\overline{Q_{i,j}^{NCOR}} - \overline{Q_{i,j}^{EO}}\right)$$

$$Q_i^{FSS} = \left(\frac{FTT}{\Delta t + FTT}\right)\frac{1}{288}\sum_{j=0}^{287}\left(Q_{i,j}^{NCOR} - Q_{i,j}^{EO}\right)$$

4.0 ÉTALONNAGE

Dans le présent chapitre, la présentation des différents modèles proposés et utilisés selon les différents types de signaux utilisés sera effectuée. La première section portera sur le modèle initial proposé pour l'étalonnage des signaux NDR. Par la suite, la divergence entre le modèle initial et les résultats obtenus sera présentée. Conséquemment, le modèle de rechange utilisé et la procédure de détermination des paramètres de mesure des signaux NDR, suivront. Enfin, la dernière section présentera le modèle utilisé pour l'étalonnage des signaux DR.

4.1 Modèle proposé initialement pour l'enlèvement des signaux NDR

Le modèle présenté initialement à la section 3.4 se base sur le fait que les signaux parasitaires NDR sont séparables selon EO et DC. Selon ce modèle, la valeur de chaque pixel peut être obtenue en faisant la somme du décalage électronique (EO) et du taux de génération de courant d'obscurité (q^{DC}) multipliée par le temps d'intégration (Δt). Les équations 10 et 11 représentent ce modèle de façon plus détaillée. En l'absence d'éclairement, c'est-à-dire lorsque les seuls signaux parasitaires sont NDR, toutes les valeurs obtenues peuvent être représentées selon ce modèle. En supposant que chacun des pixels du CCD ont des valeurs différentes et uniques, l'équation régissant ce modèle général est la suivante:

$$Q_{i,j}^{NDR} = Q_{i,j}^{EO} + q_{i,j}^{DC}\ \Delta t\,, \tag{23}$$

Comme il a été fait mention à la section 3.4, le décalage électronique (EO) est un signal ajouté de façon analogique pour éviter d'avoir des valeurs négatives. Par conséquent, il avait été déduit que ce signal EO ne devrait pas changer en fonction du nombre de rangées sommées.

Pour retrouver une valeur (DN) en fonction du nombre de rangées sommées, il avait été proposé que le décalage électronique à enlever était la valeur moyenne répartie sur les rangées sommées. Cette affirmation peut alors être représentée de la façon suivante:

$$\overline{Q}_{i,b}^{EO} = \frac{1}{n}\sum_{j=b}^{b+n-1} Q_{i,j\ i,j}^{EO}\,, \tag{24}$$

Où n: nombre de rangées sommée
b: bande sélectionnée

Il avait aussi été proposé que la valeur du taux de génération du courant d'obscurité (DC) pour les rangées sommées soit n fois le taux moyen de génération de DC. Le taux moyen de génération de DC multiplié par le nombre de rangées sommées correspond à la somme des taux de génération sur les rangées. Cette dernière affirmation peut alors être représentée de la façon suivante:

$$n * \overline{Q}_{i,b}^{DC}\ \Delta t = \sum_{j=b}^{b+n-1} q_{i,j}^{DC}\ \Delta t\,, \tag{25}$$

À partir de ces deux équations, il est possible d'enlever les valeurs de EO et de DC sur toutes images recueillies quel que soit le nombre de rangées sommées et le temps d'intégration sélectionné. La formule générale regroupant ces deux équations est la suivante:

$$Q_{i,j}^{NDR} = \overline{Q}_{i,b}^{EO} + \Delta t \sum_{j=b}^{b+n-1} q_{i,j}^{DC}, \tag{26}$$

4.2 Identification des lacunes du modèle initial

Après avoir programmé le modèle, certaines divergences entre le modèle initial et les résultats obtenus ont été observées. Le programme "calibrate_eo_dc_old" (voir annexe A.3) est le programme qui a été initialement écrit pour représenter ce modèle. À la suite de l'exécution de ce programme sur des données recueillies, le modèle proposé s'est avéré valide seulement lorsqu'une seule rangée était sommée (constatation initiale). Plus le nombre de rangées sommées était grand, plus l'erreur était grande et pire était l'étalonnage.

Considérons l'exemple où l'acquisition était effectuée sans illumination (M=0 et avec le couvercle placé sur l'objectif de la caméra). Lors de la sommation de 4 rangées, les valeurs calculées de NDR selon l'équation 26 étaient toujours supérieures aux valeurs obtenues. Ceci avait pour résultat de donner une matrice étalonnée ayant des valeurs nulles puisque la soustraction (fonction sub_lh de l'annexe A.1) donnait des valeurs nulles lorsque la valeur à soustraire était plus grande que le signal mesuré.

Ce résultat illogique a été suffisant pour conclure que le modèle initialement proposé n'était pas valide dans les cas spécifiques où plusieurs rangées étaient sommées. Pour s'assurer de la véracité de cette dernière affirmation, les deux modes (spatial et spectral) ont été testés avec des cas ayant plusieurs rangées sommées.

4.3 Modèle utilisé pour l'enlèvement des signaux NDR

Le modèle initial étant invalide, il s'est avéré nécessaire de trouver une autre façon pour contourner le problème. À cet effet, une solution relativement simple a été trouvée pour l'enlèvement des signaux NDR en mode spectral seulement.

En mode spectral, bien qu'il soit possible en pratique de sommer jusqu'à 48 rangées, le facteur de rangées sommées sera compris entre 1 et 6 la majeure partie du temps. La sommation de plus de 6 rangées est habituellement inutile puisqu'en ayant 6 rangées sommées, il est possible d'avoir toutes les 511 directions de regard En se basant sur ce fait, il a été jugé possible et valable en terme d'étalonnage, d'effectuer un étalonnage distinct basé sur le nombre de rangées sommées. Cette approche a créé 10 matrices distinctes de EO et DC (5 matrices EO et 5 matrices DC) qui sont reliées au nombre de rangées sommées. Par exemple, lorsqu'il y a trois rangées sommées, les dimensions des deux matrices EO et DC représentant tout le CCD ont 512x96(288/3) pixels.

4.4 Procédure de détermination des paramètres d'étalonnage des signaux NDR

La première méthode de détermination des paramètres consistait à reformer l'image du CCD complet par la recombinaison des images partielles. Par la suite, 5 images complètes étaient obtenues avec différent temps d'intégration. Avec l'aide de la fonction poly_fit d'IDL, les composantes $Q_{i,j}^{EO}$ et $q_{i,j}^{DC}$ étaient calculées selon l'équation 23. Ainsi, deux matrices de 512x288 étaient reconstruites. Le temps total nécessaire à l'acquisition, la lecture et le traitement des données pour l'évaluation de ces deux matrices était d'environ deux heures.

La détermination des nouveaux paramètres d'étalonnage selon le modèle de rechange nécessite environ cinq fois plus de temps. En effet, il faut reconstituer 5 matrices différentes de EO et DC pour les cinq différents facteurs de rangées sommées. Pour ce faire, l'acquisition de 175 fichiers ayant tous une durée moyenne d'enregistrement de 1 minute et 30 secondes doit être effectuée.

La détermination des paramètres d'étalonnage nécessite quatre étapes distinctes. La première étape consiste à faire l'acquisition des fichiers images sur bande magnétique. Cette étape prend à elle seule environ 5 heures. La seconde étape consiste à lire les fichiers sauvegardés sur bande magnétique et à transférer ceux-ci sur disque dur en format binaire lisible. Cette étape nécessite environ 1 heure. La troisième étape consiste à lire l'en-tête de chaque fichier afin de retrouver l'image ayant le nombre minimal de lignes (trames). Finalement, la dernière étape consiste à lire les fichiers sauvegardés sur disque dur et à effectuer le traitement numérique des données dans le but de retrouver les paramètres d'étalonnage voulus.

Voici les étapes qu'il faut suive pour déterminer les paramètres d'étalonnage. Plusieurs nom de fichiers IDL seront énonces au cours de la description de celles-ci. Une description plus détaillée de ces fichiers se trouve à l'annexe A.

Étapes de détermination des paramètres d'étalonnage:

Étape 1: Acquisition des fichiers images sur bande magnétique.

Pour effectuer l'acquisition des images sur bande magnétique, il faut respecter un ordre précis. Tout changement dans l'ordre d'acquisition aura pour conséquence d'effectuer la lecture des mauvais fichiers sur la bande magnétique.

1. Allumer la CASI et tous les instruments associés et laisser le système se stabiliser pendant environ 60 minutes.
2. Exécuter la commande casiisvs –R 1928 –F 0 –M 0 dans le répertoire casi4.30 de l'ordinateur de contrôle.
3. En mode spectral, sélectionner 79 directions de regard ('look direction'), et 40 comme direction de regard central('center look direction')[1].
4. Sélectionner 1 pour le nombre de rangées sommées.
5. Sélectionner 50ms pour le temps d'intégration.
6. Faire l'enregistrement pendant 20 secondes pour chaque 50ms de temps d'intégration.

7. Répéter les étapes 3, 4, 5 et 6 six autres fois pour des directions de regard central de 113, 186, 259, 332, 405 et 473, respectivement.
8. Répéter les étapes 3, 4, 5, 6 et 7 quatre autres fois pour des temps d'intégration de 100ms, 150ms, 200ms et 250ms, respectivement.
9. Répéter le procédé 3, 4, 5, 6, 7 et 8 quatre autres fois pour des nombres de rangées sommées de 2, 3, 4 et 6, respectivement.

[1] La première image de toute la série d'images vise uniquement à initialiser tout le système. Généralement, cette image est supprimée après la lecture et n'est pas considérée comme la première image de la série.

Étape 2 : Lecture des fichiers sauvegardés sur bande magnétique.

La lecture des fichiers s'effectue de façon automatique par l'exécution de la procédure read_tape_eo_dc. La lecture sur la bande magnétique se fait selon l'ordre d'acquisition mentionné à l'étape 1. Fait important à remarquer, les 7 premières images sont vides pendant la lecture des données sur la bande. Par conséquent, il faut s'attendre à voir 1+7 (0+0 blocs de données), c'est-à-dire 1 bloc pour la première image (rejetée ensuite) et 7 pour les fichiers im01_r01_050A à im01_r01_050G, respectivement. La raison probable pour laquelle ces fichiers sont vides est que leur acquisition doit s'effectuer avec un débit de données trop grand. En effet, un temps d'intégration de 50 ms avec une seule rangée sommée représente un taux de transfert d'environ 945kb/s, ce qui est très exigeant en écriture pour la bande magnétique.

Étape 3 : Lecture de l'entête de chaque fichier.

Ensuite, la procédure read_header_eo_dc effectue la lecture de l'en-tête de chaque fichier dans le but principal de trouver le fichier ayant le moins grand nombre de lignes (trame). Il faut ignorer les sept fichiers vides (im01_r01_050A à im01_r01_050G). La lecture de l'en-tête vise à lire le nombre de lignes (trame) dans chaque fichier et d'inscrire cette valeur dans le fichier nl_list.dat. Le fichier ln_list.dat est un fichier IDL contenant la variable str_nl_list. Cette variable est une matrice de caractères alphanumériques ayant 2 colonnes et 175(7*5*5) rangées. La première colonne contient les noms des fichiers et la seconde contient le nombre de lignes associées à ces fichiers en caractères alphanumérique. Par la suite, ce fichier nl_list.dat est lu et le plus petit nombre de lignes (trame) contenu dans les fichiers im02_r01_050A à im25_r06_250G est sauvegardé dans la variable min_num_of_lines. Finalement, cette variable est sauvegardée dans le fichier IDL nl_min.dat afin d'être utilisée subséquemment dans la procédure eval_average_spec_eo_dc.

Étape 4 : Détermination des paramètres d'étalonnage.

La détermination des paramètres d'étalonnage, c'est-à-dire des paramètres servant principalement à l'étalonnage du EO et du DC s'effectue par la procédure

eval_average_spec_eo_dc. Essentiellement, cette procédure a pour fonction de créer un fichier de données appelé eo_dc_mats.dat ayant comme variables les matrices EO et DC pour tout le CCD et pour les colonnes EO ILS et SL respectivement. Ces variables se nomment respectivement, eo_array, dc_array, eo_3c_array et dc_3c_array. Pour toutes les valeurs de rangées sommées, une matrice EO et DC sera associée.

L'exécution des étapes 2, 3 et 4 peut se faire à partir d'un seul fichier d'appel (batch files) nommée batch_read_all_eo_dc. Celui-ci a été créé dans le but d'exécuter le fichier script idl_script_eo_dc. Par la suite, ce script fait à tour de rôle appel à trois procédures IDL: read_tape_eo_dc, read_header_eo_dc et eval_average_spec_eo_dc.

La reconstruction des matrices EO et DC originales ayant une dimension de 288 divisé par le nombre de rangées s'effectue par l'entremise de la fonction reconstruc_array_from_eo_dc. De plus, la matrice EO peut être retrouvée par la fonction reconstruc_array_from_eo. Celle-ci est utilisée principalement lors de l'évaluation des coefficients FSS.

4.5 Modèle utilisé pour l'enlèvement des signaux DR

Le modèle utilisé pour l'enlèvement des signaux DR est le modèle théorique cité à la section 3.5. Comme il a été mentionné, les signaux DR se décomposent en deux parties: le FSS et le SL.

Le calcul de la valeur FSS en mode spectral s'effectue selon l'équation 15 lorsqu'une seule rangée est sommée. Cependant, cette équation peut être modifiée selon le nombre de rangées sommées de la façon suivante:

$$Q_i^{FSS} = \left(\frac{FTT}{\Delta t + FTT}\right)\frac{n}{288}\sum_{J=0}^{288/n-1}\left(Q_{i,J}^{NCOR} - Q_{i,J}^{EO}\right), \tag{27}$$

Cette équation générale a été déduite en effectuant le même développement présenté à la fin de la section 3.5 avec plusieurs rangées sommées. Essentiellement, le calcul du Q_i^{FSS} s'effectue tout d'abord en enlevant le EO de chaque trame reçue. Par la suite, celui-ci est calculé en faisant la moyenne sur tous les pixels spectraux et en multipliant le tout par le facteur $FTT/(\Delta t + FTT)$.

Le calcul de la valeur de SL est beaucoup plus simple que celle de FSS. Contrairement au FSS qui varie selon les colonnes, le SL varie selon les rangées. C'est ainsi qu'une colonne SL a été ajoutée en mode spectral pour en faire l'évaluation. Pour obtenir une valeur du SL net à partir de cette colonne, il faut enlever le EO, le DC et le FSS correspondant à chacun des pixels de SL. Cette dernière affirmation peut s'exprimer selon l'équation suivante:

$$Q_{i=SL,J}^{SL} = Q_{i=SL,J}^{NCOR} - \left(\frac{FTT}{\Delta t + FTT}\right)\frac{n}{288}\sum_{J=0}^{288/n-1}\left(Q_{SL,J}^{NCOR} - Q_{SL,J}^{EO}\right) - Q_{i=SL,J}^{EO} - Q_{i=SL,J}^{DC}, \tag{28}$$

En fait, toutes valeurs résiduelles sur cette colonne, c'est-à-dire suite à l'enlèvement du EO, DC et du FSS, sont consirérées comme associées au SL.

Il est à noter que le calcul de FSS et de SL doit être effectué pour chaque trame, car les valeurs associées de FSS et SL pour une trame sont valables uniquement pour la trame en question.

5.0 RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX

Le présent chapitre fait la présentation des résultats expérimentaux obtenus suite à l'étalonnage des signaux parasitaires. Tout d'abord, les résultats expérimentaux obtenus à la suite de l'étalonnage individuel des signaux NDR et DR seront présentés. Pour ce faire, une étude comparative des signaux non-étalonnés versus ceux étalonnés sera discuté en premier lieu. Par la suite, les résultats expérimentaux obtenus à la suite de l'étalonnage combiné des signaux NDR et DR seront présentés. Finalement, l'évaluation du temps de transfert de trame et des effets de diffusion lumineuse interne seront abordés.

5.1 Variation typique des valeurs obtenues

Les valeurs typiques obtenues pendant la détermination des paramètres NDR dépendent du nombre de rangées sommées et du temps d'intégration. Pour mieux représenter ces variations, le tableau I a été obtenu à partir des images im01_r01_050A à im25_r06_250G. Les données représentées dans ce tableau sont les moyennes des pixels spectraux comprises entre la $144^{ième}$ et $155^{ième}$ rangée et ceux de la $257^{ième}$ colonne spatiale.

Tableau I - Valeurs typiques obtenues selon le temps d'intégration et le nombre de rangées sommées

Temps d'intégration (ms)	Nombre de rangées sommées				
	1	2	3	4	6
50	126.817	137.129	148.093	159.916	184.058
100	140.220	158.114	182.775	208.612	260.879
150	151.121	180.739	220.539	259.922	338.841
200	162.690	206.824	259.035	310.674	420.680
250	174.109	228.225	301.443	370.642	510.935

On remarquera que plus le nombre de rangées sommées augmente, moins il y a d'échantillons qui sont utilisés pour faire la moyenne. Par exemple, 12 échantillons sont utilisés pour faire la moyenne lorsqu'une seule rangée est sommée, alors que 2 échantillons seulement sont utilisés pour la moyenne lorsqu'il y a 6 rangées sommées.

5.2 Étalonnage des signaux NDR

Les résultats escomptés résultant de la correction des signaux NDR dépendent du nombre de rangées sommées et du temps d'intégration sélectionné. De façon générale, plus le temps d'intégration et le nombre de rangées sommées augmentent, moins l'étalonnage est efficace. Comme nous l'avons mentionné à la section 3.4, les signaux NDR sont décomposables selon EO et DC.

Comme espéré, la composante DC augmente de façon proportionnelle au nombre de rangées sommées. Un exemple typique des valeurs DC obtenues est présenté au tableau suivant:

Tableau II - Valeurs de DC selon le nombre de rangées sommées

DC(i=99,j)	Nombre de rangées sommées				
J(0 :287)	1	2	3	4	6
j=36	0.227719	0.458645	0.788177	1.09523	1.68274
j=37	0.212962	0.458645	0.788177	1.09523	1.68274
j=38	0.206072	0.510486	0.788177	1.09523	1.68274
j=39	0.205349	0.510486	0.789308	1.09523	1.68274
j=40	0.241902	0.481262	0.789308	1.08164	1.68274
j=41	0.225659	0.481262	0.789308	1.08164	1.68274

Les pixels sélectionnés dans ce tableau sont les pixels spectraux compris entre la $37^{ième}$ et la $42^{ième}$ et ce pour la $100^{ième}$ colonne spatiale.

Par contre, contrairement aux attentes, la composante EO diminue lorsque le nombre de rangées augmente. Un exemple typique de cette diminution est représenté au tableau suivant.

Tableau III - Valeurs de EO selon le nombre de rangées sommées

EO(i=99,j)	Nombre de rangées sommées				
J(0 :287)	1	2	3	4	6
j=36	109.285	106.490	103.466	101.111	94.9658
j=37	110.066	106.490	103.466	101.111	94.9658
j=38	110.977	106.064	103.466	101.111	94.9658
j=39	110.904	106.064	103.667	101.111	94.9658
j=40	109.412	106.378	103.667	101.996	94.9658
j=41	109.658	106.378	103.667	101.996	94.9658

Ces deux tableaux permettent de visualiser la divergence entre le modèle initialement proposé et le modèle modifié.

Considérons par exemple la bande 7, qui contient un nombre de rangées sommées de 6 et un temps d'intégration de 200ms. La bande n correspond aux pixels spectraux compris entre r*(n-1) et r*n-1 et ce sur une échelle de 0 à 287. Par conséquent, les pixels 36 à 41 correspondent à la bande 7 lorsque le nombre de rangées sommées est fixé à 6.

Pour retrouver la valeur combinée (exprimée en DN) de EO et DC, le calcul suivant (selon le premier modèle) devait être effectué:

EO = (109.285+110.066+110.977+110.904+109.412+109.658)/6 =110.050
DC = 0.227719+ 0.212962+0.206072+0.205349+0.241902+0.225659 = 1.31965
EO+DC*200 = 373.98 = 374

Pour retrouver la valeur combinée (exprimée en DN) de EO et DC, le calcul suivant (selon le modèle modifié) devait être effectué.

EO = 94.9658
DC = 1.68274
EO+DC*200 = 431.514 = 432

La valeur moyenne recueillie sur plusieurs trames suite à la détermination des paramètres EO et DC est 429 (pour cette bande et colonne spécifique). Par conséquent, le deuxième modèle choisi présente de meilleurs résultats .

Dans ce cas spécifique, le modèle initial donne des valeurs combinées de EO et DC plus faibles que les valeurs réelles observées. Par contre, dans d'autre cas, les valeurs obtenues de EO et DC combinées étaient supérieures aux valeurs observées. C'est dans ces cas spécifiques que des zéros apparaissaient un peu partout dans l'image étalonnée. Ceci était dû à une surévaluation des valeurs EO et DC.

Pour mieux comprendre la correction du EO et DC, j'invite le lecteur à consulter les données mentionnées à l'annexe B.1 et celles de l'annexe B.2. Ces données donnent une comparaison entre des données non-étalonnées et des données étalonnées suite à l'enlèvement du EO et DC. Les trois exemples présentés (a, b et c) représentent trois images prises dans différentes conditions. L'image "a" représente l'image d'origine utilisée pour l'obtention des paramètres EO et DC. L'image "b" représente une image prise sans illumination (M=0). L'image "c" représente une image prise sous une illumination uniforme. La procédure IDL faisant la correction des signaux NDR est calibrate_eo_dc.pro.

5.3 Étalonnage des signaux DR

L'étalonnage effectué pour corriger les signaux DR s'effectue en mode spectral de la même façon que le modèle mentionné à la section 4.5. Contrairement à l'étalonnage des signaux NDR, l'étalonnage des signaux DR s'effectue sur chaque trame de façon indépendante. Pour chaque trame, le calcul du FSS doit être effectué selon l'équation 27. Par la suite, le calcul du SL s'effectue sur la colonne en question selon l'équation 28.

Une fois les vecteurs spatiaux FSS et spectraux SL créés pour chaque trame, une matrice représentant la somme de ces vecteurs est créée pour chaque trame. En fait, cette opération est effectuée par la fonction make_frame_fss_sl créée dans IDL. Ensuite, les trames de correction de FSS et SL sont soustraites pour chaque trame de l'image.

Pour mieux comprendre la correction du FSS et du SL, j'invite le lecteur à consulter les données mentionnées à l'annexe B.1 et celles de l'annexe B.3. Ces données présentent une comparaison entre les valeurs non-étalonnées et étalonnées suite à la correction du FSS et du SL. Les trois exemples présentés (a ,b et c) représentent trois images prises dans différentes conditions. L'image "a" représente l'image d'origine utilisée pour la détermination des paramètres EO et DC. L'image "b" représente une image prise en l'absence d'illumination (M=0).

L'image "c" représente une image prise sous une illumination uniforme. La procédure IDL appliquant la correction des signaux DR est calibrate_fss_sl.pro.

5.4 Étalonnage combiné pour la correction des signaux NDR et DR

L'étalonnage des signaux NDR et DR consiste à enlever les signaux combinés NDR et DR. Pour ce faire, chaque trame est initialement corrigée en faisant la correction des signaux EO seulement. À partir de ces trames corrigées, le calcul des composantes FSS et SL est effectué et ce, pour chaque trame. Par la suite, les signaux EO et DC sont soustraits pour chaque trame non-corrigée. Enfin, les signaux FSS et SL calculés précédemment sont enlevés des trames corrigées pour le EO et le DC. Les trames ainsi obtenues sont alors étalonnées et exemptes de tous les signaux parasitaires NDR et DR

Pour mieux comprendre l'enlèvement du EO, DC, FSS et SL, j'invite le lecteur à consulter les données mentionnées à l'annexe B.1 et celles de l'annexe B.4. Ces données donnent une comparaison entre des données non-étalonnées et des données étalonnées suite à la correction du EO, DC, FSS et SL. Les trois exemples présentés (a, b et c) représentent trois images prises dans différentes conditions. L'image "a" représente l'image d'origine utilisée pour la détermination des paramètres EO et DC. L'image "b" représente une image prise sans illumination (M=0). L'image "c" représente une image prise sous une illumination uniforme. La procédure IDL faisant l'enlèvement des signaux NDR et DR est calibrate_all.pro.

5.5 Évaluation du temps de transfert de trame

Afin de vérifier que le modèle utilisé pour l'enlèvement du FSS était valide, il a été jugé nécessaire d'évaluer le temps de transfert de trame. Selon la formule 27, le Q_i^{FSS} est en relation directe avec le temps de transfert de trame (FTT) et le temps d'intégration (Δt). À cet effet, une technique permettant l'évaluation du FTT selon cette formule a été déduite.

La technique utilisée pour l'évaluation du FTT est la suivante. Tout d'abord, la sélection des paramètres x et y est effectuée comme suit:

$$y = \frac{n}{288} \sum_{j=0}^{288/n-1} \left(Q_{I,J}^{NCOR} - Q_{I,J}^{EO} \right) \quad et \quad x = \Delta t .$$

Par la suite, la formule suivante a été obtenue suite à l'insertion de ces paramètres dans l'équation 27:

$$Q_i^{FSS} = \left(\frac{FTT}{x + FTT} \right) y .$$

Finalement, en isolant le paramètre y dans la formule précédante, l'équation suivante a été dérivée:

$$y(x) = \left(\frac{Q_i^{FSS}}{FTT}\right) x + Q_i^{FSS}.$$

Selon cette équation, l'ordonnée à l'origine $y(0)$ de la courbe ainsi produite représente le Q_i^{FSS} et la pente dy/dx représente Q_i^{FSS}/FTT. Par conséquent, l'évaluation du FFT est ainsi possible en effectuant le rapport entre l'ordonnée à l'origine et la pente ainsi obtenue:

$$FTT = \frac{y(0)}{dy/dx}$$

Le recours à une sphère d'intégration a été nécessaire afin d'illuminer uniformément l'ensemble des pixels spatiaux étudiés. Par la suite, la saisie des séquences avec des temps d'intégration différents (100, 125, 150, 175 et 200ms) a été effectuée afin de permettre l'évaluation du FTT. Afin de retrouver une valeur de FTT pour tous les coefficients des rangées sommées, la même procédure a été répétée avec 2, 3, 4 et 6 rangées sommées.

Suite à l'évaluation du FTT pour chaque colonne spatiale, plusieurs FTT ont été obtenus. De même, différents FTT ont été obtenus selon le nombre de rangées sommées. L'évaluation du FTT en fonction du nombre de rangées sommées a été jugée nécessaire à cause de la possibilité d'avoir des rangées sommées en mode spectral. Le tableau suivant représente les valeurs obtenues du FTT selon ces rangées sommées. La procédure utilisée pour évaluer le FTT est evaluate_ftt.pro.

Tableau IV - Valeurs moyennes du FTT et déviations standards moyennes du FTT selon le nombre de rangées sommées.

FTT	**Nombre de rangées sommées**				
(sur 75 échantillons)	1	2	3	4	6
Moyenne(ms)	1.600	1.250	0.906	0.900	1.129
Déviation standard(ms)	0.064	0.112	0.086	0.069	0.111

* Selon le manufacturier, le temps de transfert de trame est de l'ordre de 1.55ms.

5.6 Évaluation des effets de diffusion lumineuse

Tout comme pour le temps de transfert de trame, les effets de diffusion lumineuse (SL) ont été étudiés. En mode spectral, une colonne représentant le SL est présente afin de mesurer cette quantité de lumière diffusée un peu partout dans la caméra. Dans le but d'évaluer les valeurs obtenues à partir de cette colonne, elles ont été comparées à d'autres valeurs obtenues par une technique d'évaluation spécifique.

La technique d'évaluation spécifique du SL est la suivante. Tout d'abord, en utilisant la sphère d'intégration, la caméra a été disposée de telle sorte que seulement 20 pixels spatiaux environ soient illuminés par la sphère d'intégration. Une représentation graphique du profil obtenu selon les 101 pixels spatiaux utilisés est présentée à la figure 6. Les 101 pixels spatiaux

sont en fait le nombre maximal de colonnes pouvant être sélectionnées lorsqu'aucune rangée n'est sommée.

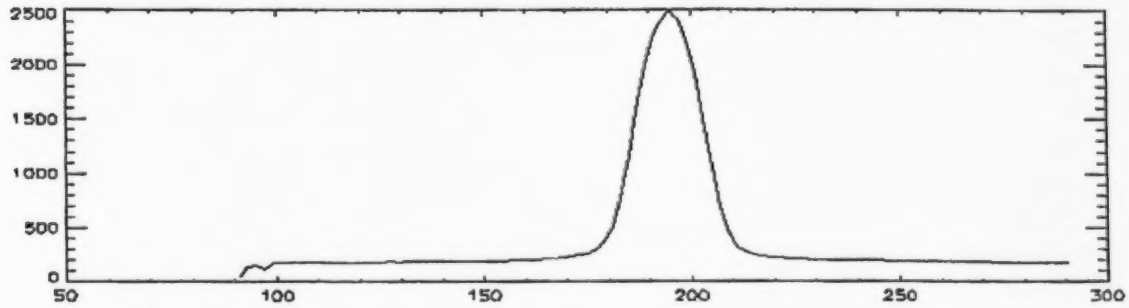


FIGURE 6 - Profil obtenu après l'illumination d'environ 20 pixels spatiaux

La technique utilisée afin d'évaluer le SL est la suivante. Tout d'abord, des pixels limites sont identifiés en concordance avec la figure 7. Il est ainsi possible d'identifier le nombre total de direction de regard comme étant égal à f-a. Par la suite, on définit le paramètre variable x comme étant e-b. Durant la sélection, il faut s'assurer que le centre de regard (m) soit le plus centré possible avec le lobe représentant l'illumination. Dans l'exemple de la figure 5, le centre de regard est 192.

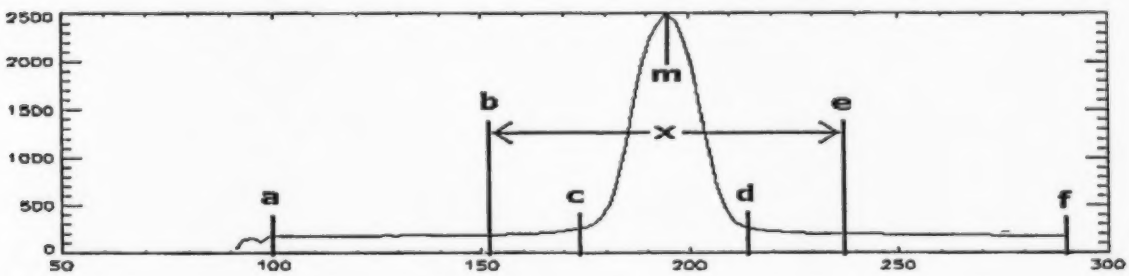


FIGURE 7 - Identification des bornes utilisées

Pour retrouver une valeur de SL, il faut premièrement enlever les composants EO, DC et FSS sur chacune des données brutes respectives. Suite à cet correction, les seuls signaux restants sont ceux associés à la radiance ($q^{R}_{i,j}$) et à la diffusion lumineuse (q^{SL}_{i}). Pour évaluer la diffusion lumineuse sur une rangée spécifique, il faut évaluer le paramètre y en fonction de toutes les valeurs possibles de x. Les équations suivantes montrent l'évaluation du paramètre y en fonction de b, e et x:

$$y(e-b)=\sum_{j=b}^{e}\left(Q_{i,j}^{NCOR}-Q_{i,j}^{EO}-Q_{i,j}^{DC}-Q_{j}^{FSS}\right)$$

$$\Downarrow$$

$$y(x)=\sum_{j=m-x/2}^{m+x/2}\left(Q_{i,j}^{NCOR}-Q_{i,j}^{EO}-Q_{i,j}^{DC}-Q_{j}^{FSS}\right)$$

La fonction y(x) correspond à la somme des valeurs corrigées des pixels compris entre b et e. En théorie, cette somme devrait aussi représenter la fonction y(x) suivante:

$$y(x)=(e-b)\,q_i^{SL}+\sum_{d}^{e}q_{i,j}^{R}$$
$$=x\,q_i^{SL}+cons\tan te$$

Par conséquent, en effectuant le graphique de y en fonction de x, la pente de la droite ainsi obtenue devrait donc être représentative du signal SL sur cette rangée spécifique. La valeur du q_i^{SL} peut alors être représentée selon la formule suivante:

$$q_i^{SL}=\frac{dy}{dx}.$$

Après avoir évalué les valeurs de q_i^{SL} pour toutes les rangées, ces valeurs sont ensuite comparées avec les valeurs contenues dans la colonne SL. Pour ce faire, la correction du EO, DC et FSS a été effectuée sur la colonne SL. Par la suite, pour évaluer si les valeurs données par la colonne SL présentent une relation linéaire avec celles évaluées, un graphique superposant les deux vecteurs SL a été généré (figure 8). La procédure utilisée pour évaluer et pour comparer le SL est evaluate_sl.pro.

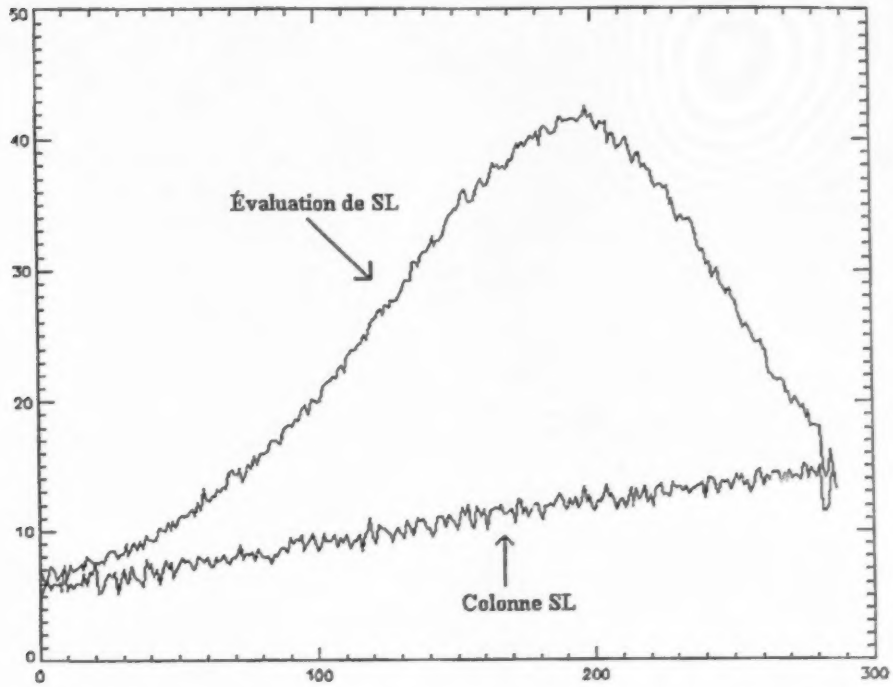


FIGURE 8 - Comparaison entre les valeurs obtenues de la colonne SL avec celles évaluées.

6.0 DISCUSSION ET EXPLICATION DES RÉSULTATS

Ce chapitre vise à discuter et expliquer certains résultats obtenus au chapitre 5. Tout d'abord, la première section de ce chapitre discutera de différentes observations. Par la suite, des explications sur les résultats de chaque section du chapitre 5 seront présentées en détails. La section suivante fera état des différentes causes possibles des divergences observées. Finalement, ce chapitre se terminera par une discussion sur la précision escomptée des mesures obtenues suite à l'étalonnage.

6.1 Discussion

Durant l'étalonnage radiométrique de la caméra, diverses constations ont été faites. La plupart de ces constatations ont été notées lors du traitement des images recueillies en mode spectral et ce, durant l'étalonnage des signaux NDR.

La première constatation était l'observation d'un contour de données erronées autour de l'image corrigée. Ce contour était, de façon générale, associé à la première direction de regard (look direction) et à la première et dernière bande spectrale. Selon les premières analyses, la dernière direction de regard ne semblait pas présenter ces données erronées. Par contre, durant la sélection de la partie de l'image valable après l'étalonnage, la première et la dernière bande , ainsi que la première et la dernière direction de regard ont été rejetées afin de conserver une symétrie entre l'image originale et l'image corrigée. La procédure utilisée pour faire la sélection de la partie de l'image qui est valide est select_good_part.pro.

Une deuxième constatation était l'augmentation graduelle du signal avec le nombre de trames mesurées. En effet, les valeurs prises de la même scène ont tendance à augmenter légèrement d'une trame à l'autre. Cette augmentation est de l'ordre de 6 DN pour une séquence de 400 trames. C'est à la suite de l'étalonnage des signaux NRD, que cet effet est devenu très apparent. La figure 9 présente cet effet réparti sur 380 trames après la correction des signaux EO et DC.

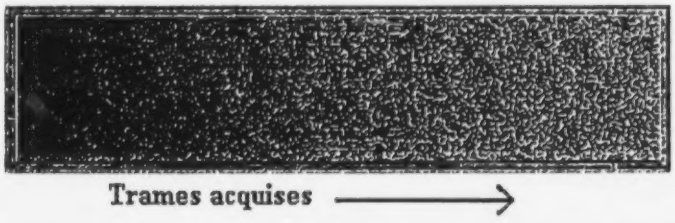


FIGURE 9 - Effet de l'augmentation graduelle des valeurs sur les trames.

Les valeurs calculées de EO et DC durant la détermination des paramètres d'étalonnage NDR sont obtenues en effectuant la moyenne sur environ 400 trames différentes. La correction des signaux NDR étant uniformément appliquée quelle que soit la trame, l'augmentation graduelle des signaux devient alors apparente après l'étalonnage.

Une autre constatation était l'observation de zéros un peu partout dans l'image étalonnée suite à la correction du EO et du DC. En raison d'une correction excessive du signal EO et DC, l'image étalonnée obtenue possédait alors beaucoup de valeurs nulles. L'une des causes qui pourrait expliquer cette observation serait la différence de température du CCD pendant la détermination des paramètres NDR et l'acquisition de l'image à étalonner. Les effets de la température seront expliqués un peu plus en détail dans la section 6.3.

6.2 Explication des résultats obtenus

Cette section vise à présenter quelques explications sur les différents résultats présentés au chapitre précédent. Pour ce faire, cette section sera divisée en sous-sections correspondant aux sections du chapitre précèdent.

6.2.1 Explication sur la variation typique des valeurs obtenues (section 5.1)

Le tableau présenté à la section 5.1 permet de représenter l'effet du nombre de rangées sommées et du temps d'intégration sur les valeurs numériques enregistrées. Si on représente les valeurs obtenues dans ce tableau selon une fonction linéaire en fonction du temps d'intégration, on obtient les valeurs suivantes:

Pour r=1 val(DN) = 115.88 + 0.234*Δt
r=2 val(DN) = 112.94 + 0.462*Δt
r=3 val(DN) = 107.49 + 0.766*Δt
r=4 val(DN) = 104.90 + 1.047*Δt
r=6 val(DN) = 99.01 + 1.627*Δt

Par conséquent, il est possible de constater que le décalage électronique EO diminue lorsqu'on augmente le nombre de rangées sommées. De plus, le courant d'obscurité semble augmenter de façon linéaire avec le nombre de rangées sommées. Il est aussi possible de remarquer, en traçant le graphique des valeurs obtenues en fonction du temps d'intégration, que cette relation suit une droite de 1er degré. Cette relation linéaire a été observée pour tout nombre de rangées sommées compris entre 1 et 6. En fait, c'est cette particularité qui sera exploitée lors de la sélection du modèle de rechange de l'étalonnage.

6.2.2 Explication des résultats obtenus suite à l'étalonnage par la correction des signaux NDR (section 5.2)

L'exactitude de l'étalonnage NDR selon le nombre de rangées sommées et le temps d'intégration dépend principalement de la température du CCD durant l'étalonnage. Il a été démontré que même de faibles variations de température ont un effet important sur le taux de génération de DC. Par conséquent, il est recommandé de laisser la caméra se stabiliser pour au moins une heure et de prendre quelques images afin d'obtenir les conditions présentes pendant la détermination des paramètres d'étalonnage.

L'une des raisons justifiant que le modèle proposé initialement ne fonctionnait pas selon nos attentes initiales est le fait que la composante EO diminue en fonction du nombre de rangées sommées.

D'autre part, la divergence du modèle proposé initialement pourrait aussi s'expliquer par une différence entre le taux de génération calculé selon le premier modèle comparativement au second. Par exemple, en considérant le tableau II des valeurs DC, il est possible de remarquer que les valeurs sommées pour des rangées 38 et 39 (0.206072+0.205349) ne sont pas égales à celles des deux rangées sommées (0.510486). Cette constatation semble alors prouver que le modèle utilisé initialement n'était pas valide.

De plus, en analysant le même tableau, il est aussi possible de déduire que les valeurs selon les rangées sommées n'ont pas de relation entre elles. Pour mieux comprendre cette dernière affirmation, il importe de réfléchir sur la démonstration suivante:

Soit pour j=36 et 37
Les valeurs de DC sont de 0.227719 et 0.212962 pour r=1 et de 0.458645 pour r=2
Et pour j=38 et 39
Les valeurs de DC sont de 0.206072 et 0.205349 pour r=1 et de 0.510486 pour r=2

Du fait que (0.227719+0.212962)>(0.206072+0.205349) pour r=1, les valeurs données pour r=2 devraient suivre une relation analogue, c'est-à-dire que 0.45865 devrait être plus grand que 0.510486. Comme ce n'est pas le cas, il y n'a de toute évidence aucune relation reliant entre elles les valeurs trouvées selon le nombre de rangées sommées.

Pour mieux comprendre les raisons pour lesquelles ce phénomène se produit, il importe d'étudier de façon approfondie le fonctionnement de la caméra.

6.2.3 Explication des résultats obtenus suite à l'étalonnage par la correction des signaux DR (section 5.3)

L'étalonnage des signaux FSS semble s'effectuer de façon appropriée selon les observations effectuées sur quelques vecteurs FSS étudiés. Du fait qu'il soit difficile d'évaluer individuellement tous les vecteurs FSS de chaque trame, seulement quelques-uns ont été analysés. Les valeurs contenues pour chacun de ces vecteurs échantillonnés semblent bien suivre le modèle décrit par l'équation 27.

Le temps d'exécution pour l'étalonnage des signaux FSS et SL en utilisant la procédure d'étalonnage calibrate_fss_sl.pro est relativement élevé puisque l'enlèvement doit s'effectuer de façon indépendante pour toutes les trames présentes. En moyenne, l'étalonnage par l'enlèvement du FSS et SL en utilisant la procédure calibrate_fss_sl s'effectue à un taux de 3.2 trames par secondes. Il faut donc s'attendre à environ 2 minutes d'exécution pour l'étalonnage d'une séquence d'image ayant 400 trames et une seule rangée sommée.

Note: Il importe de noter que les données présentées en annexe B.3 sont étalonnées pour FSS et SL et que le SL utilisé pour cet étalonnage est celui de la colonne SL après la correction

pour les composants de EO, DC et FSS. Cette colonne a été utilisée malgré le fait que les valeurs obtenues sont probablement erronées.

6.2.4 Explication des résultats obtenus suite à l'étalonnage des signaux NDR et DR (section 5.4)

L'étalonnage combiné des signaux NDR et DR dépendent des résultats obtenus lors de l'étalonnage individuel des signaux NDR et DR. Par conséquent, les explications énoncées précédemment pour les signaux NDR et RD s'appliquent aussi à l'étalonnage combiné de tous les signaux parasitaires.

En ce qui concerne le temps d'exécution pour l'étalonnage des signaux NDR et DR, celui-ci est similaire à l'étalonnage des signaux FSS et SL.

Note Il importe de noter que les données présentées en annexe B.4 sont étalonnées pour EO, DC, FSS et SL et que le SL utilisé pour cet étalonnage est celui de la colonne SL après correction des composants de EO, DC et FSS. La colonne SL a été utilisée malgré le fait qu'elle soit probablement erronée.

6.2.5 Explication des résultats obtenus suite à l'évaluation du temps de transfert de trame (section 5.5)

Suite à l'évaluation du temps de transfert de trame, les résultats obtenus étaient assez cohérents. En effet, selon la technique utilisée et mentionnée à la section 5.5, le temps de transfert de trame a été évalué comme étant environ 1.60 ms lorsqu'une rangée seulement était sommée. Cette valeur est cohérente avec celle rapportée par le manufacturier (1.55 ms). Par contre, lorsque ce temps de transfert a été évalué pour plusieurs rangées sommées, le temps d'intégration mesuré était légèrement inférieur à celui donnée par le manufacturier. Une raison qui pourrait expliquer ce résultat est le fait que la première bande et la dernière bande sont sélectionnées pour l'évaluation du temps de transfert de trame. Sachant que la première et la dernière bande sont incohérentes avec les autres valeurs, il serait possible que l'erreur observée avec plusieurs rangées sommées soit due à ce phénomène. De plus, les écarts observés lors de l'augmentation du nombre de rangées pourraient aussi être attribués au fait qu'il y a moins d'échantillons utilisés, le nombre d'échantillons étant inversement proportionnel au nombre de rangées sommées.

6.2.6 Explication des résultats obtenus suite à l'évaluation des effets de diffusion lumineuse (section 5.6)

Suite à l'analyse des valeurs obtenues provenant de la colonne SL après correction du EO et DC, il a été possible de déduire que cette colonne présente des données erronées. En effet, pour que celles-ci soient valides, il aurait fallu qu'il y ait au moins un facteur multiplicatif simple entre les données de cette colonne et celles dérivées du modèle présentée à la section 5.6. Le fait que les profils présentés à la figure 7 ne possèdent pas de relation linéaire simple, semble confirmer que les valeurs données par cette colonne sont erronées.

6.3 Causes possibles de divergences

Plusieurs causes pourraient être à l'origine de la divergence entre les données obtenues avec celles prédites par les modèles proposés.

Dans le cas de la colonne SL, la cause la plus probable de divergence est que les valeurs données par la colonne SL sont simplement erronées et ce, à cause d'un mauvais fonctionnement interne de l'imageur. De plus, ayant déjà noté que la colonne EO est aussi incohérente, cette nouvelle constatation semble confirmer que les colonnes EO, ILS et SL sont toutes erronées et qu'il soit impossible de les utiliser.

Durant l'étalonnage radiométrique des signaux NDR, il a été constaté que la température du CCD influait grandement sur le taux de génération de DC. Sachant que le taux de génération de DC affecte l'étalonnage radiométrique des données, la correction des signaux NDR n'était pas optimale selon les conditions de température. Par exemple, les données destinées à effectuer la correction des signaux NDR (EO et DC) ont été mesurées lorsque la température interne de la caméra (CCD) était au environ 288°K. Malgré le fait que la CASI possède un système intégré de stabilisation en température, celle-ci augmente graduellement pendant les premières heures de fonctionnement à un taux d'environ 0.7°K/ heure[1]. Par exemple, il a été observé qu'une image prise 30 minutes après la mise en fonction de l'imageur peut avoir jusqu'à 50 DN de moins comparativement à une image qui aurait été obtenue après plusieurs heures d'opération[2]. Avec comme réglages r=3 et Δt=150ms, une image saisie environ 30 minutes après le démarrage de l'appareil) aura une valeur typique pour EO+DC d'environ 215 DN. La même image saisie pendant la détermination des paramètres NDR aura une valeur typique d'environ 230 DN. Cette différence fait en sorte que pendant l'étalonnage des signaux NDR de l'image saisie après 30 minutes, cette image aura beaucoup de valeurs nulles, car une sur-correction[3] aura été effectuée.

[1] Au début de la saisie, c'est-à-dire après environ 30 minutes d'opération, la température interne du CCD semblait se stabiliser à 286°K. Après environ 6 heures d'opération, la température du CCD est de 290.5°K. On évalue à 0.7°K/heure le taux moyen d'élévation de la température sur cette période.

[2] Ici, il est sous-entendu que les deux images sont prises avec une configuration équivalente (même nombre de rangées sommées et même temps d'intégration) en mode spectral.

[3] La sur-correction consiste à enlever trop de signal pendant l'étalonnage. Ceci a pour conséquence d'introduire beaucoup de zéros un peu partout dans l'image étalonnée.

7.0 CONCLUSION

À la lumière des résultats obtenus et des explications énoncées, l'étalonnage par la correction des signaux parasitaires semble s'effectuer assez bien lorsque les conditions de saisie des images sont semblables à celles qui prévalent lors de l'étalonnage de la caméra. Comme il a été mentionné, la température du CCD durant la mesure influe sur le taux de génération de DC. Un taux de génération variable de DC nuit beaucoup au processus d'étalonnage radiométrique de la caméra. Afin de minimiser cet effet, il a été suggéré de laisser stabiliser la caméra et de prendre quelques images tampons avant de débuter l'enregistrement des séquences réelles.

En ce qui concerne les valeurs données dans la colonne SL, celles-ci semblent erronées selon une analyse simple faite à la section 5.6. Cela a pour effet de rendre difficile la correction de ce signal parasitaire. Concernant les résultats présentés à la section 5.2 et les explications associées fournies à la section 6.2.2, il semble y avoir une certaine incohérence entre les valeurs de DC obtenues pour une seule rangée sommée et celles obtenues pour 2 rangées sommées. Il serait donc important d'étudier cet aspect dans une étude plus poussée du fonctionnement de l'imageur.

De façon générale, plusieurs travaux ont été effectués durant le cadre de ce travail de recherche. Parmi quelques uns de ceux-ci, il y a l'amélioration du fichier read_casi, qui est la première version de la procédure en langage IDL pour faire la lecture des images saisies par la caméra CASI. Par la suite, l'élaboration d'un modèle d'étalonnage de rechange a été développé pour le mode spectral. À partir de ce modèle, les procédures d'étalonnage ont été programmées et ce, pour les différents signaux parasitaires comme NDR et DR. Finalement, l'évaluation des performances des algorithmes d'étalonnage a été effectuée en fonction du modèle de rechange.

Les travaux futurs à effectuer dans le but d'obtenir un étalonnage radiométrique complet de la caméra CASI intensifiée sont nombreux. Parmi ceux-ci, il y a tout d'abord l'élaboration d'un modèle d'étalonnage pour le mode spatial, car ce mode n'a pas été étudié durant le présent travail de recherche. À partir de ce modèle, la création d'une procédure de détermination des paramètres d'étalonnage pour ce mode devra être effectuée. Par la suite, à partir des paramètres d'étalonnage recueillis, les procédures d'étalonnage en mode spatial devront être programmées. Enfin, les données étalonnées pourront être représentées en termes d'unité spectral de radiance spectrale absolue en générant les coefficients de sensibilité radiométrique et les ratios de correction absolus pour chaque pixel du CCD.

RÉFÉRENCES

1. S.K. Babey and R.J. Soffer, "Radiometric calibration of the compact airborne spectrographic imager (CASI)", Canadian Journal of Remote Sensing, Vol. 18, No.4. Oct. 1992, p.233.

2. ITRES, "Compact Airborne Spectrographic Imager (CASI): User' Manual", ITRES Research Limited, Suite #155, 2635-37th Ave. NE, Calgary, AB, Canada, Revised version 1996.

3. ITRES, "Casi 701x Range Gated Spectral Imager: Supplementary User's Manual", ITRES Research Limited, Suite155, 2635-37th Ave. NE, Calgary, AB, Canada, November 25, 1997.

ANNEXE A: DESCRIPTION DES FONCTIONS ET PROCÉDURES UTILISÉES

A.1 Fonctions et procédures créées

Pendant l'exécution de certaines procédures, certaines fonctions sont utilisées. La liste de ces fonctions est add_lh, addborder_eo_dc, average_spec_column_band, bytelh_to_int, filesize, fit, frame_to_mat, in, int_to_bytelh, interpolate_element, make_copy_file, make_frame_fss_sl, mat_to_frame, offset, r2wave, read_element, read_field, reconstruct_array_from_eo, reconstruc_array_from_eo_dc, same, slope, sub_lh et wave2r, respectivement.

Fonction: *add_lh*

La fonction add_lh permet l'addition de deux vecteurs dans lesquels les données sont de format 'low/high byte'. Le format 'low/high byte' implique que l'élément n+1 vaut 256 fois l'élément n. Par exemple, le vecteur L/H suivant [122,23] équivaut à représenter l'entier 6010 (122+23*256). Cette fonction donne des résultats valides tant que le résultat en valeur entière ne dépasse pas 32768 (2^{15}).

Syntaxe: vec_sum_lh = add_lh(vec_1_lh,vec_2_lh)
Exemple: vec_sum_lh = add_lh([123,23],[32,44])
vec_sum_lh est alors égal à: [155,67]

Fonction: *addborder_eo_dc*

La fonction addborder_eo_dc était utilisée initialement dans le but d'ajouter un contour de 1 à une matrice d'éléments. Initialement, les matrices EO et DC étaient de dimension 510x286. Il fallait alors ramener cette matrice à une dimension de 512x288, ce qui correspond aux dimensions du CCD.

Syntaxe: array4x4 = addborder_eo_dc(array3x3)
Exemple: array3x3 = [[1,2,3],[4,5,6],[7,8,9]]
array4x4 = addborder_eo_dc(array3x3)
array4x4 est alors égal à: [[1,1,2,3,3],[1,1,2,3,3],[4,4,5,6,6],[7,7,8,9,9],[7,7,8,9,9]]

Fonction: *average_spec_column_band*

La fonction average_spec_column_band est utilisée dans le but d'obtenir les valeurs moyennes sur les colonnes et bandes pour l'ensemble des différentes trames. La fonction retourne une matrice ayant comme dimension (nc)x(nb)x(2), où nc est le nombre de colonnes déterminé par c2-c1+1; nb est le nombre d'échantillons spectraux; et 2 pour la moyenne et écart type des valeurs échantillonnées.

Syntaxe: mat_ans = average_spec_column_band('<nom du fichier>,ns,nb,l1,l2,c1,c2)
Où: ns = nombre total de directions de regard
nb = nombre de bandes (échantillons spectraux)
l1 = ligne (trame) où débute l'échantillonnage

l2 = ligne (trame) où se termine l'échantillonnage
c1 = colonne initiale
c2 = colonne finale
Exemple: soit filename = './image_spectral/im01_r01_100'
ns=82 & nb = 288 & l1 =1 & l2 = 250 & c1 = 4 & c2 = 79
ans_mat = average_spec_column_band(filename,ns,nb,l1,l2,c1,c2)

Dans ce cas, ans_mat(0,199,0) correspond à la valeur moyenne obtenue sur le pixel représentant la première direction de regard et la 200^{ième} rangée spectrale. Le 0 sert à indiquer que c'est la moyenne (1 pour l'écart type).

Fonction: *bytelh_to_int*

La fonction bytelh_to_int convertit un vecteur ayant 2n éléments de format 'byte L/H' en vecteur ayant n entiers. Cette fonction donne des résultats valides tant que le résultat en valeur entière ne dépasse pas 32767 (2^{15}-1).

Syntaxe: int_vec = bytelh_to_int(vec_lh)
Exemple: int_vec = bytelh_to_int ([123,23,32,44,37,99])
int_vec est alors égal à: [6011, 11296, 25381]

Fonction: *filesize*

La fonction filesize retourne la dimension du fichier en byte. La valeur retournée est en format entier long. Cette fonction est valide tant que le nom fichier ainsi que son chemin d'accès sont valides.

Syntaxe: size_byte = filesize('<Nom du Fichier>')
Exemple: size_byte = filesize('addborder_eo_dc.pro')
Size_byte est alors égal à: 699

Fonction: *fit*

La fonction fit effectue un ajustement (lissage) polynomial du vecteur en y en fonction de x. Cette fonction a comme variable d'entré le vecteur x, le vecteur y et l'ordre du polynôme.

Syntaxe: vec_fit = fit(vec_x,vec_y,ordre)
Exemple: vec_fit = fit([1, 2, 3, 4, 5], [1.1, 4.2, 9.4, 16.5, 25.9], 2)
vec_fit est alors égal à: [1.11152, 4.19443, 9.34876, 16.5745, 25.8717]

Fonction: *frame_to_mat*

La fonction frame_to_mat convertit une trame de longueur ncxnb en une matrice de dimension nc par nb.

Syntaxe: mat = frame_to_mat(frame,nc,nb)
Exemple: mat = frame_to_mat([1,2,3,4,1,2,3,4,1,2,3,4],4,3)

mat est alors égal à [[1,2,3,4],[1,2,3,4],[1,2,3,4]]

Fonction: *in*

La fonction in retourne 1 (vrai) si l'élément (argument 1) est parmi la liste d'éléments (argument 2). Dans le cas contraire, la fonction retourne 0 (faux).

Syntaxe: ans = in(element, elements_list)
Exemple: ans = in(3, [1, 2, 3, 4, 5])
ans est alors égal à: 1

Fonction: *int_to_bytelh*

La fonction int_to_byte fait l'inverse de la fonction bytelh_to_int. Par conséquent, cette fonction convertit un vecteur de n éléments entiers en un vecteur de 2*n éléments de format 'L/H byte'. Cette fonction donne des résultats valides tant que le résultat en valeur entière ne dépasse pas 32767 (2^{15}-1).

Syntaxe: bytelh_vec = int_to_bytelh(int_vec)
Exemple: bytelh_vec = int_to_bytelh([6011, 11296, 25381])
bytelh_vec est alors égal à: [123, 23, 32, 44, 37, 99]

Fonction: *interpolate_element*

La fonction interpolate_element interpole un élément quelconque, après avoir effectué un fit polynomial d'ordre quelconque.

Syntaxe: element_fit = interpolate_element(vector_x, vector_y, element_x, order)
Exemple: element_fit = interpolate_element([1, 2, 3, 4], [1.1, 4.2, 9.4, 16.5], 3.5,2)
element_fit est égal à 12.6899

Procédure: *make_copy_file*

La procédure make_copy_file est une procédure qui a été créée dans le but de copier les fichiers d'en-tête utilisés afin de visionner les images avec ENVI. C'est le fichier qui contient les différentes informations pertinentes de l'image. Cette procédure effectue une copie d'un fichier texte seulement.

Syntaxe: make_copy_file('<Nom du fichier source>','<Nom du fichier destination>')
Exemple: make_copy_file('im01_r01_100.hdr','im01_r01_100cal1.hdr')

Fonction: *make_frame_fss_sl*

La fonction make_frame_fss_sl a été spécialement conçue afin de créer un vecteur représentant une trame dans laquelle chaque coefficient contient les valeurs de FSS et SL sommées. En effet, le FSS étant un paramètre variant selon les éléments d'une même rangée et le SL selon les éléments d'une même colonne, il est possible de construire un vecteur combiné de

ces éléments additionnés. Soit le vecteur FSS d'une longueur de 512 et le vecteur SL d'une longueur de 288, la matrice fss et sl créée sera de dimension 512x288 (147456) dans laquelle chaque élément est la somme des éléments respectifs de FSS et SL.

Syntaxe: fss_et_sl = make_frame_fss_sl (vector_fss, vector_sl)
Exemple: fss_et_sl = make_frame_fss_sl([1, 2, 3, 4], [1,2,3])
fss_et_sl est égal à: [2, 3, 4, 5, 3, 4, 5, 6, 4, 5, 6, 7]

Fonction: *mat_to_frame*

La fonction mat_to_frame convertit une matrice de dimension nc par nb à une trame de longueur ncxnb.

Syntaxe: frame = mat_to_frame(mat,nc,nb)
Exemple: frame = mat_to_frame([[1,2,3,4],[1,2,3,4],[1,2,3,4]],4,3)
frame est alors égal à [1,2,3,4,1,2,3,4,1,2,3,4]

Fonction: *offset*

La fonction offset retourne l'ordonnée à l'origine d'une fonction linéaire en faisant un lissage polynomial de degré 1. Cette constante correspond à la valeur où la droite coupe l'axe des y.

Syntaxe: offset_value = offset(vecteur_x,vecteur_y)
Exemple: x = [1, 2, 3, 4, 5]
offset_value = offset(x, 2*x+10)
offset_value est égal à: 10

Fonction: *r2wave*

La fonction r2wave convertit un numéro de rangée en une longueur d'onde (nm) spécifique selon les paramètres G_0 à G_3 (identifiés à l'intérieur de la fonction).

Syntaxe: wave_value = r2wave(range_num)
Exemple: wave_value = r2wave(100)
wave_value est égal à: 725.925

Fonction: *reconstruc_array_from_eo*

La fonction reconstruc_array_from_eo retourne la valeur de la matrice eo à soustraire afin d'obtenir l'étalonnage dû au décalage électronique. Celle-ci a été créée spécifiquement afin d'obtenir la valeur de FSS. Cette reconstruction s'effectue à partir de la matrice EO créée par la procédure eval_average_spec_eo_dc. Contrairement à reconstruc_array_eo_dc, celle-ci a comme unique paramètre d'entrée le nombre de rangées sommées.

Syntaxe: eo_only_array = reconstruct_array_from_eo(eo_array, nr)
Exemple: restore,'./image_spectral/eo_dc_mats.dat'

eo_only_array = reconstruct_array_from_eo(eo_array, 2)

Fonction: *reconstruc_array_from_eo_dc*

La fonction reconstruc_array_from_eo_dc retourne la valeur de la matrice eo+dc à soustraire pour l'étalonnage des signaux NDR. Cette reconstruction s'effectue à partir des matrices EO et DC créées par la procédure eval_average_spec_eo_dc. Celle-ci dépend des valeurs des paramètres d'entrées comme le nombre de rangées sommées et le temps d'intégration.

Syntaxe: eo_and_dc_array = reconstruct_array_from_eo_dc(eo_array,dc_array, nr,it)
Exemple: restore,'./image_spectral/eo_dc_mats.dat'
eo_and_dc_array = reconstruct_array_from_eo_dc(eo_array,dc_array, 2,100)

Procédure: *read_element*

La procédure read_element est utilisée pour la lecture de l'en-tête du fichier CASI. La fonction read_element est utilisée pour lire les éléments d'un fichier binaire. Les éléments étant séparés par des espaces (byte 32), ils peuvent être lus individuellement. Pour ce faire, la procédure lit parmi la chaîne de n éléments (argument 1) et sélectionne le premier élément. Celui-ci est retourné par l'argument 2 de la procédure. De même, la procédure retourne la chaîne de n-1 éléments restants dans l'argument 3.

Syntaxe: read_element(field_elements, element, reminder_elements)
Exemple: soit element_list = '20 30 40 50 60' & element_list = byte(element_list)
read_element(element_list, element, reminder_elements)
string(element) est égal à: '20'
string(reminder_elements) = ' 30 40 50 60'

Procédure: *read_field*

Tout comme la procédure read_element, la procédure read_field est utilisée pour la lecture de l'en-tête du fichier CASI. Contrairement à read_element qui lit les éléments pour un champ particulier, read_field lit les champs pour l'ensemble de l'en-tête. Le même principe de lecture est utilisé. La procédure lit l'ensemble de l'en-tête composé de n champs séparés par le caractère nul, c'est-à-dire ayant la valeur binaire 0. Pour un en-tête composé de n champs, la procédure sélectionne le premier champ qui est composé respectivement de son nom et de la liste de ses éléments. La liste des éléments est par la suite lue par la procédure read_element.

Syntaxe: read_field(fileheader, field_name, field_elements, fields_reminder)
Exemple: soit fileheader = [byte('field1 11 22 33'),0,byte('field2 44 55 66')]
read_field(fileheader, field_name, field_elements, fields_reminder)
string(byte(field_name)) = 'field1'
string(byte(field_elements)) = ' 11 22 33'
string(byte(field_reminder)) = 'field2 44 55 66'

Fonction: *same*

La fonction same retourne 1 (vrai) si la liste d'éléments (argument 1) est identique à la liste d'éléments (argument 2). Dans le cas contraire, la fonction retourne 0 (faux).

Syntaxe: ans = same(element_list1, elements_list2)
Exemple: ans = same([1, 2, 3, 4, 5], [1, 2, 3, 4, 5])
ans est alors égal à: 1

Fonction: *slope*

La fonction slope retourne la pente d'une fonction linéaire en faisant un lissage polynomial de degré 1. La pente correspond à la valeur de dy/dx de la droite y(x).

Syntaxe: slope_value = slope(vecteur_x,vecteur_y)
Exemple: x = [1, 2, 3, 4, 5]
slope_value = slope(x, 2*x+10)
slope_value est égal à : 2

Fonction: *sub_lh*

La fonction sub_lh fait la soustraction de deux vecteurs dans lesquels les données sont de format 'low/high byte'. Le format 'low/high byte' implique que l'élément n+1 vaut 256 fois l'élément n. Par exemple, le vecteur L/H suivant [122,23] équivaut à représenter l'entier 6010(122+23*256). Cette fonction donne des résultats valides tant que les valeurs exprimées en format 'L/H byte' ne dépassent pas en valeur entière 32768 (2^{15}). De plus, dans le cas où la valeur à soustraire serait supérieure à celle soustraite (v2 > v1), la valeur obtenue est 0.

Syntaxe: vec_sub_lh = sub_lh(vec_1_lh,vec_2_lh)
Exemple: vec_sub_lh = sub_lh([123,63,55,45],[32,44,33,65])
vec_sub_lh est alors égal à: [91,19,0,0]

Fonction: *wave2r*

La fonction wave2r convertit une longueur d'onde spécifique en nm à un numéro de rangée du CCD. Les paramètres G_0 à G_3 sont identifiés à l'intérieur de la fonction.

Syntaxe: row_value = wave2r(wavelength)
Exemple: row_value = wave2r(800)
row_value est égal à: 61.7987 (rangée 62)

A.2 Procédures de détermination des paramètres d'étalonnage

Procédure: *eval_average_spec_eo_dc*

La procédure eval_average_spec_eo_dc fait le calcul de la moyenne et de l'écart type de toutes les images sur toutes les colonnes et bandes spectrales. Pour ce faire, les images partielles sont combinées pour représenter toutes les colonnes représentant les 512 pixels spatiaux du CCD.

Par la suite, ces informations sont sauvegardées dans quatre variables appelées avg_mat_eo_dc, dev_mat_eo_dc, avg-mat_eo_ils_sl et dev_mat_eo_ils_sl, respectivement. Ces quatre variables sont essentiellement des matrices de données de dimension (512x288x5x5) pour le eo_dc et de (3_288x5x5) pour les colonnes eo, ils et sl. Ces données sont obtenues exclusivement pour un nombre de rangées sommées (r) égal à [1,2,3,4,6] et des temps d'intégration (it) de [50,100,150,200,250]. Toutes ces variables sont sauvegardées dans le fichier IDL ansmat.dat.

Enfin, une interpolation sur ces données est effectuée dans le but de retrouver les valeurs pour r=01 et it=50. Ces valeurs ne pouvaient être mesurées à cause du temps d'intégration trop court et du nombre élevé de rangées spectrales.

Finalement, les valeurs de EO et DC sont générées à partir des matrices moyennes (avg_mat) créées. Le calcul du décalage électronique (EO) et du courant d'obscurité (DC) s'effectue par l'entremise de la fonction fit avec ordre 1. Ces valeurs sont sauvegardées dans les variables eo_array, dc_array, eo_3c_array et dc_3c_array. Ces quatre variables ont des dimensions respectives de (512x288x5), (512x288x5), (3x288x5), (3x288x5). La dimension 5 est pour les cinq sélections de rangée sommées, soit r=[1,2,3,4,6]. Toutes ces variables sont sauvegardées dans le fichier IDL eo_dc_mats.dat.

A.3 Procédures d'étalonnage

Procédure: *calibrate_eo_dc*

L'enlèvement des signaux parasitaires indépendants de la radiance (NDR), c'est-à-dire de EO et DC, peut s'effectuer par l'entremise de la procédure d'étalonnage calibrate_eo_dc. En effet, à partir des fichiers *.img et *.hdr obtenus à la suite de l'exécution de read_casi_david ou encore read_casi_file, on peut effectuer cet étalonnage et enlever les signaux parasitaires NRD. Essentiellement, la procédure utilise le fichier *.img et la matrice d'étalonnage sauvegardée sous le nom eo_dc_mats.dat pour effectuer l'étalonnage. Basée sur le temps d'intégration choisi et le nombre de rangées sommées, la procédure étalonne toutes les données contenues dans le fichier image[1]. Un fait important à noter est que cette procédure effectue seulement l'étalonnage pour un nombre de rangées sommées compris entre 1 et 6 inclusivement. En ce qui concerne le temps d'intégration, l'étalonnage est optimal lorsque le temps d'intégration est compris entre 50ms et 250ms.

Afin de permettre la visualisation avec le logiciel ENVI, la procédure sauvegarde l'image étalonnée et l'en-tête sous deux nouveaux noms de fichier. Les fichiers étalonnés contiennent

l'ajout de "cal1" à la fin de chaque nom de fichiers. Par exemple, les fichiers non-étalonnés *.img et *.hdr seront étalonnés et ensuite sauvegardés dans les fichiers *cal1.img et *cal1.hdr. En fait, le fichier de l'en-tête de l'image étalonnée *cal1.hdr est une copie exacte de l'en-tête de l'image non-étalonnée *.hrd. Le visionnement de l'image étalonnée peut alors s'effectuer comme d'habitude avec l'utilisation de ENVI.

Syntaxe: calibrate_eo_dc ('<Nom du Fichier>')
Exemple: calibrate_eo_dc ('./image_spectral/im01_r01_100')
Les fichiers suivants seront alors créés dans le répertoire "./image_spectral/":
im01_r01_100cal1.img, im01_r01_100cal1.hdr

[1] Étalonnage en mode spectral seulement.

Procédure: *calibrate_fss_sl*

Contrairement à calibrate_eo_dc, la procédure calibrate_fss_sl enlève les signaux parasitaires qui dépendent de la radiance (DR), c'est-à-dire de FSS et SL. De façon similaire à calibrate_eo_dc, la procédure calibrate_fss_sl produit des fichiers étalonnés qui possèdent l'ajout "cal2" à la fin de leur nom. Les mêmes critères en ce qui concerne le temps d'intégration et le nombre de rangées sommées s'applique[1].

Syntaxe: calibrate_fss_sl ('<Nom du Fichier>')
Exemple: calibrate_fss_sl ('./image_spectral/im01_r01_100')
Les fichiers suivants seront alors créés dans le répertoire "./image_spectral/":
im01_r01_100cal2.img, im01_r01_100cal2.hdr

[1] Étalonnage en mode spectral seulement.

Procédure: *calibrate_all*

La procédure calibrate_all effectue l'étalonnage de l'image par l'enlèvement de tous les signaux parasitaires. En effet, les signaux parasitaires NDR et DR (qui sont respectivement les signaux EO, DC, FSS et SL) sont enlevés de l'image initiale.

De façon similaire aux autres procédures d'étalonnage, la procédure calibrate_all produit des fichiers étalonnés qui possèdent l'ajout "cal3" à la fin de leur nom. Les mêmes critères en ce qui concerne le temps d'intégration et le nombre de rangées sommées s'applique[1].

Syntaxe: calibrate_fss_sl ('<Nom du Fichier>')
Exemple calibrate_fss_sl ('./image_spectral/im01_r01_100')
Les fichiers suivants seront alors créés dans le répertoire "./image_spectral/":
im01_r01_100cal3.img, im01_r01_100cal3.hdr

[1] Étalonnage en mode spectral seulement.

A.4 Procédures initiales modifiées

Initialement, la procédure qui était utilisée pour la lecture des fichiers CASI était read_casi. Par la suite, cette procédure a été améliorée. Parmi, les modifications apportées à cette procédure, il y a la sélection adéquate des pixels spatiaux selon le nombre d'espacement entre les directions de regard ('looks directions'). Cela a été possible à la suite de l'analyse des différentes images obtenues en mode spectral.

Une autre modification importante à la procédure initiale est la sélection des différentes directions de regard pour chaque trame. Comme on pouvait le constater, toutes les trames créées possédaient une non-uniformité à la première valeur de chaque trame. En quelque sorte, les trames semblaient toutes avoir un décalage de un pixel (deux bytes). La première solution choisie afin de contourner ce problème était de faire la saisie de la rangée à partir du deuxième pixel et de déplacer le premier pixel à la fin de cette même rangée.

Après discussion, il a été conclu que cette non-uniformité était due à une mauvaise synchronisation électronique pendant la lecture des trames. Par conséquent, la première solution choisie représentait de manière erronée le dernier pixel spatial. À cet effet, le code original a alors été modifié afin de corriger cette erreur et éviter les mauvaises sélections de pixels pendant l'étalonnage. Le code suivant représente les corrections apportées au code initial.

Code initial:

```
outframesize1(j*a:(j+1)*a-3l) = inframesize(fhl+j*a+2l:fhl+(j+1)*a-1)
outframesize1((j+1)*a-2l:(j+1)*a-1l) = inframesize(fhl+j*a:fhl+j*a+1)
```

Code corrigé:

```
outframesize1(j*a:(j+1)*a-1l) = inframesize(fhl+j*a+2l:fhl+(j+1)*a+1)
```

Ensuite, la correction de l'ordre des bandes en mode spatial a été effectuée. Selon le manuel de l'utilisateur de la caméra CASI, le numéro des bandes aurait du être en ordre croissant en mode spatial. Par contre, suite à l'analyse des fichiers CASI recueillis, l'ordre de ces bandes s'est avéré en ordre décroissant. Par exemple, la première bande qui était nommée Band1 dans les fichiers *.img créés en mode spatial était en réalité la dernière bande (BandN), et vise-versa. Cette erreur a été corrigée par l'inversion de l'ordre de saisie des différentes bandes.

Une autre modification apportée au fichier read_casi original a été de séparer la lecture de l'en-tête de la lecture des fichiers CASI. Cela s'est avéré nécessaire étant donné le nombre important de lignes de programmation consacrées à la lecture de l'en-tête. Pour ce faire, la déclaration des variables globales a été effectuée par l'utilisation des blocs communs. À cet effet, le fichier read_casi a été renommé read_casi_file. Ce fichier appelle à tour de rôle les procédures read_casi_header et read_casi_david. Voici une représentation graphique des changements apportés:

read_casi → read_casi_file → read_casi_header
read_casi_david

Finalement, deux autres modifications mineures ont été apportées au fichier d'origine. La première est le changement de nom de certaines variables. Ce changement a été effectué afin d'éviter la confusion entre les variables et dans certain cas afin de rendre la compréhension du programme plus facile. La seconde modification mineure est la lecture de l'en-tête. En effet, cette lecture a été rendue plus simple par l'utilisation des fonctions mentionnées en [A.1], c'est-à-dire read_elements et read_fields.

Procédure: *read_casi_file*

La procédure read_casi_file fait la lecture des fichiers CASI et produit les fichiers *.img et *.hdr afin de permettre leur visualisation avec le logiciel ENVI. Selon le mode sélectionné, les fichiers *.img et *.hdr sont créés dans le cas où le mode spatial est sélectionné. En mode spectral, les fichiers créés sont respectivement *.img, *.hrd, *src.img et *src.hdr.

Syntaxe: read_casi_file('<Nom du Fichier>')
Exemple: read_casi_file('./image_spectral/im01_r01_100')
Les fichiers suivants sont alors créés dans le répertoire "./image_spectral/":
im01_r01_100.img, im01_r01_100.hdr, im01_r01_100src.img et
im01_r01_100src.hdr

A.5 Procédures d'appels

Par définition, une procédure d'appel est une procédure ayant pour but premier d'appeler d'autres procédures. Contrairement à un fichier d'appel (batch files), celles-ci ont généralement un paramètre d'entrée commun.

Procédure: *read_casi_file*

Comme mentionné plus tôt, la procédure read_casi_file fait l'appel de deux autres sous-procédures: read_casi_header et read_casi_david, respectivement. De façon graphique, celles-ci sont appelées de la façon suivante:

read_casi_file → read_casi_header
read_casi_david

Syntaxe: read_casi_file('<Nom du Fichier>')
Exemple: read_casi_file('./image_spectral/im01_r01_100')
Les fichiers suivants seront alors créés dans le répertoire "./image_spectral/":
im01_r01_100.img, im01_r01_100.hdr, im01_r01_100src.img et
im01_r01_100src.hdr

Procédure: *read_and_calib_casi_file*

Tout comme read_casi_file, la procédure read_and_calib_casi_file fait l'appel de plusieurs sous-procédures: read_casi_header, read_casi_david, calibrate_eo_dc et calibrate_fss_sl, respectivement. De façon graphique, ces appels se font de la façon suivante:

read_and_calib_casi_file → read_casi_header
read_casi_david
calibrate_eo_dc
calibrate_fss_sl
calibrate_ali

Syntaxe: read_and_calib_casi_file('<Nom du Fichier>')
Exemple: read_and_calib_casi_file('./image_spectral/im01_r01_100')
Les fichiers suivants sont alors créés dans le répertoire "./image_spectral/":
im01_r01_100.img, im01_r01_100.hdr, im01_r01_100src.img,
im01_r01_100src.hdr, im01_r01_100cal1.img, im01_r01_100cal1.hdr,
im01_r01_100cal2.img, im01_r01_100cal2.hdr, im01_r01_100cal3.img,
im01_r01_100cal3.hdr

ANNEXE B: EXEMPLE DE DONNÉES RECUEILLIES

B.1 Exemples de données non-étalonnées

#1 Spatial Pixel Editor

File Options

	41	42	43	44	45	46
191	220	217	221	222	215	220
192	215	216	218	219	219	221
193	219	215	217	219	219	223
194	218	216	222	221	218	222
195	217	214	219	219	216	218
196	220	219	220	217	223	219
197	217	218	221	219	219	222
198	217	219	218	217	218	220
199	219	220	219	221	219	218

FIGURE B.1a - Données non-étalonnées sur l'image ayant servi à l'obtention des paramètres EO et DC."im10_r03_150C.img (bande 48)".

#1 Spatial Pixel Editor

File Options

	41	42	43	44	45	46
199	218	216	219	218	219	224
200	218	217	220	220	216	219
201	214	221	217	214	217	220
202	214	216	221	220	217	218
203	216	217	218	217	218	219
204	218	216	215	218	218	221
205	215	218	216	216	217	219
206	217	219	219	218	216	217
207	218	221	221	216	216	221

FIGURE B.1b - Données non-étalonnées sur une image prise sans illumination (M=0). "im01.img (bande 48)".

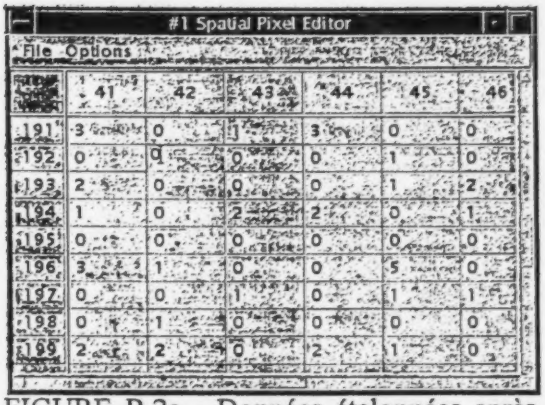
#1 Spatial Pixel Editor

File Options

	41	42	43	44	45	46
191	2071	2081	2071	2048	2110	2091
192	2073	2067	2059	2126	2118	2054
193	2144	2130	2056	2056	2074	2061
194	2089	2185	2146	2142	2149	2135
195	2148	2123	2094	2125	2143	2091
196	2102	2108	2107	2114	2181	2194
197	2093	2108	2124	2138	2129	2083
198	2076	2091	2073	2025	2011	2015
199	2095	2124	2160	2208	2200	2172

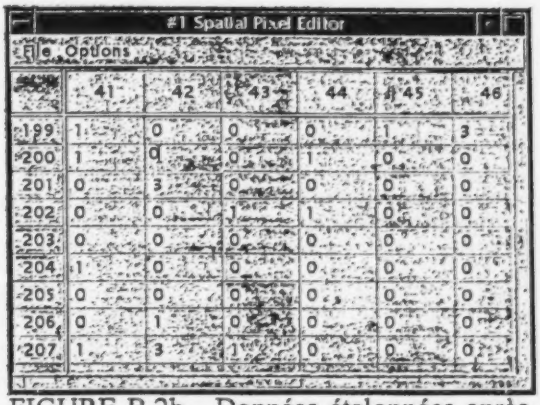
FIGURE B.1c - Données non-étalonnées sur une image prise avec illumination (M=100). "im02.img (bande 48)".

B.2 Exemples de données étalonnées avec EO et DC



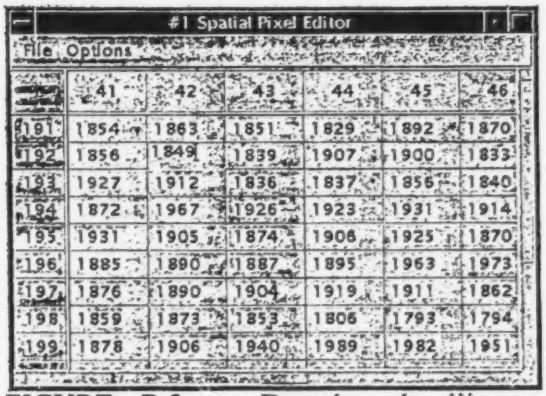
	41	42	43	44	45	46
191	3	0	1	3	0	0
192	0	0	0	0	1	0
193	2	0	0	0	1	2
194	1	0	2	2	0	1
195	0	0	0	0	0	0
196	3	1	0	0	5	0
197	0	0	1	0	1	1
198	0	1	0	0	0	0
199	2	2	0	2	1	0

FIGURE B.2a - Données étalonnées après enlèvement de EO et DC sur l'image ayant servi à l'obtention des paramètres EO et DC). "im10_r03_150Ccal1.img (bande 48)".



	41	42	43	44	45	46
199	1	0	0	0	1	3
200	1	0	0	1	0	0
201	0	3	0	0	0	0
202	0	0	1	1	0	0
203	0	0	0	0	0	0
204	1	0	0	0	0	0
205	0	0	0	0	0	0
206	0	1	0	0	0	0
207	1	3	1	0	0	0

FIGURE B.2b - Données étalonnées après enlèvement de EO et DC sur une image prise sans illumination (M=0). "im01cal1.img (bande 48)".



	41	42	43	44	45	46
191	1854	1863	1851	1829	1892	1870
192	1856	1849	1839	1907	1900	1833
193	1927	1912	1836	1837	1856	1840
194	1872	1967	1926	1923	1931	1914
195	1931	1905	1874	1906	1925	1870
196	1885	1890	1887	1895	1963	1973
197	1876	1890	1904	1919	1911	1862
198	1859	1873	1853	1806	1793	1794
199	1878	1906	1940	1989	1982	1951

FIGURE B.2c - Données de l'image étalonnée après enlèvement de EO et DC sur une image prise avec illumination (M=100). "im02cal1.img (bande 48)".

B.3 Exemples de données étalonnées avec FSS et SL

#1 Spatial Pixel Editor

File Options

	41	42	43	44	45	46
199	218	216	219	218	219	224
200	218	217	220	220	216	219
201	214	221	217	214	217	220
202	214	216	221	220	217	218
203	216	217	218	217	218	219
204	218	216	215	218	218	221
205	215	218	216	216	217	219
206	217	219	219	218	216	217
207	218	221	221	216	216	221

FIGURE B.3a - Données étalonnées après enlèvement de FSS et SL sur l'image ayant servi à l'obtention des paramètres EO et DC. "im10_r03_150Ccal2.img (bande 48)".

#1 Spatial Pixel Editor

File Options

	41	42	43	44	45	4
191	220	217	221	222	215	220
192	215	216	218	219	219	221
193	219	215	217	219	219	223
194	218	216	222	221	218	222
195	217	214	219	219	216	218
196	220	219	220	217	223	219
197	217	218	221	219	219	222
198	217	219	218	217	218	220
199	219	220	219	221	219	218

FIGURE B.3b - Données étalonnées après enlèvement de FSS et SL sur une image prise sans illumination (M=0). "im01cal2.img (bande 48)".

#1 Spatial Pixel Editor

File Options

	41	42	43	44	45	46
191	2065	2075	2065	2042	2104	2085
192	2067	2061	2053	2120	2112	2048
193	2131	2117	2043	2043	2061	2048
194	2077	2173	2134	2130	2137	2123
195	2142	2117	2088	2119	2137	2085
196	2096	2102	2101	2108	2175	2188
197	2087	2102	2118	2132	2123	2077
198	2068	2083	2065	2017	2003	2007
199	2089	2118	2154	2202	2194	2166

FIGURE B.3c - Données de l'image étalonnée après enlèvement de FSS et SL sur une image prise avec illumination (M=100). "im02cal1.img (bande 48)".

B.4 Exemples de données étalonnées avec EO, DC, FSS et SL

#1 Spatial Pixel Editor

File Options

	41	42	43	44	45	46
191	3	0	1	3	0	0
192	0	0	0	0	1	0
193	2	0	0	0	1	2
194	1	0	2	2	0	1
195	0	0	0	0	0	0
196	3	1	0	0	5	0
197	0	0	1	0	1	1
198	0	1	0	0	0	0
199	2	2	0	2	1	0

FIGURE B.4a - Données étalonnées après enlèvement de EO, DC, FSS et SL sur l'image ayant servi à l'obtention des paramètres EO et DC. "im10_r03_150Ccal3.img (bande 48)".

#1 Spatial Pixel Editor

File Options

	41	42	43	44	45	46
199	1	0	0	0	1	3
200	1	0	0	1	0	0
201	0	3	0	0	0	0
202	0	0	1	1	0	0
203	0	0	0	0	0	0
204	1	0	0	0	0	0
205	0	0	0	0	0	0
206	0	1	0	0	0	0
207	1	3	1	0	0	0

FIGURE B.4b - Données étalonnées après enlèvement de EO, DC, FSS et SL sur une image prise sans illumination (M=0). "im01cal3.img (bande 48)".

#1 Spatial Pixel Editor

File Options

	41	42	43	44	45	46
191	1848	1857	1845	1823	1886	1864
192	1850	1843	1833	1901	1894	1827
193	1914	1899	1823	1824	1843	1827
194	1860	1955	1914	1911	1919	1902
195	1925	1899	1868	1900	1919	1864
196	1879	1884	1881	1889	1957	1967
197	1870	1884	1898	1913	1905	1856
198	1851	1865	1845	1798	1785	1786
199	1872	1900	1934	1983	1976	1945

FIGURE B.4c - Données étalonnées après enlèvement de EO, DC, FSS et SL sur une image prise avec illumination (M=100). "im02cal3.img (bande 48)".